

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту
Кафедра теплотехніки та енергозбереження

«На правах рукопису»
УДК 536.24:536.31: 536.32

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис) В.І.Дешко
(ініціали, прізвище)

«___» _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 144 «Теплоенергетика»

спеціалізація «Енергетичний менеджмент та інжиніринг»

на тему: «Ефективність застосування низькоемісійних покриттів в світлопрозорих конструкціях»

Виконав: студент VI курсу, групи ОТ – 61м
(шифр групи)

Бондаренко Вадим Сергійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник доцент, к.т.н., доцент Виноградов-Салтиков В.О.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Нормоконтроль доцент, к.т.н., доцент Шкляр В.І.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 рік

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут (факультет) Інститут енергозбереження та енергоменеджменту
(повна назва)

Кафедра Теплотехніки та енергозбереження
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 144 «Теплоенергетика»
(код і назва)

Спеціалізація «Енергетичний менеджмент та інжиніринг»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В.І. Дешко
(підпис) (ініціали, прізвище)

«___» _____ 2018 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Бондаренку Вадиму Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Ефективність застосування низькоемісійних покриттів в світлопрозорих конструкціях»,

науковий керівник дисертації Виноградов-Салтиков В.О., к.т.н, доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «20» 03 2018 р. № 971-с

2. Строк подання студентом дисертації 14 травня 2018р.

3. Об'єкт дослідження Процеси теплопередачі через віконні конструкції із застосуванням низькоемісійного покриття

4. Предмет дослідження Зміна світло- та теплопропускної здатності світлопрозорих конструкцій при застосуванні енергозберігаючих покриттів.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1) провести огляд літератури з питань використання низькоемісійних покриттів для скління в Україні та світі; 2) розглянути існуючі нормативні документи, що регулюють параметри застосування скління в будівництві 3) провести математичне моделювання енергопотреб будівлі при використанні різних видів склопакетів; 4) провести

експериментальні дослідження відносно світло- та теплопропускання окремо взятих типів віконних конструкцій; 5) розробити стартап-проект.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу загальні характеристики та теплофізичні якості низькоемісійного напilenня; моделювання будівлі у програмному середовищі EnergyPlus з урахуванням географічних та погодних умов для м. Києва; проведення експериментальних випробувань з різними типами склопакетів; ідея для стартап-проекту.

7. Орієнтовний перелік публікацій підготувати матеріали досліджень для X міжнародної науково-практичної конференції «Енергетика. Екологія. Людина».

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання 12.03.2018 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Пошук матеріалу стосовно обраної теми досліджень	12.03.2018 - 15.05.2018	
2	Аналіз існуючих нормативних документів, що регулюють параметри застосування скління в будівництві	12.03.2018 - 15.03.2018	
3	Розгляд приладової бази для вимірювання коефіцієнта емісії скла	17.03.2018 - 20.03.2018	
4	Моделювання будівлі в програмному середовищі EnergyPlus, та створення 63-х варіацій запропонованого скління	25.03.2018 - 30.03.2018	
5	Проведення експериментальних досліджень	02.04.2018 - 10.04.2018	
6	Розробка стартап-проекту	11.04.2018 - 20.04.2018	
7	Нормативне оформлення магістерської дисертації	27.04.2018 - 15.05.2018	

Студент

_____ В.С. Бондаренко
(підпис) (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

_____ В.О. Виноградов-Салтиков
(підпис) (ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Дана магістерська дисертація налічує 92 сторінки, включає в себе 49 рисунки, 13 таблиць, 1 презентацію.

У роботі розглядається питання зміни теплофізичних властивостей світлопрозорих конструкцій при застосуванні енергозберігаючих покриттів, а саме різниця опору теплопередачі склопакета з низькоемісійним напиленням та без нього, адже найбільші тепловтрати зовнішньої оболонки будівлі відбуваються через віконні конструкції в зв'язку з їх низьким значенням опору теплопередачі. Також розглянуто зміну світлопропускну здатності віконних конструкцій.

Створена в модель будівлі в програмному середовищі EnergyPlus, яка може бути в подальшому використана для аналізу енергозберігаючих віконних конструкцій, а також для дослідження впливу зміни конструктивних характеристик склопакетів на енергоспоживання будівлі.

Мета роботи: створення моделі будівлі з різними видами скління в програмі для динамічного моделювання EnergyPlus та аналіз світло- та теплопропускання кожного з представлених видів склопакетів.

Об'єкт дослідження: розглянуті процеси теплопередачі через світлопрозорі конструкції із застосуванням низькоемісійного покриття, зміна теплового навантаження будівлі за рахунок відбиття інфрачервоного випромінювання.

За результатами роботи було подано матеріали на X міжнародну науково-практичну конференцію «Енергетика. Екологія. Людина», 26-27 травня, м. Київ, 2018р.

Ключові слова: низькоемісійне покриття, енергозберігаюче скло, коефіцієнт емісії, інфрачервоне теплове випромінювання, моделювання EnergyPlus, світлопрозорі конструкції, опір теплопередачі склопакета.

ABSTRACT

This master's thesis consists of 92 pages, includes 49 drawings, 13 tables, 1 presentation.

The paper deals with the problem of changing the thermophysical properties of translucent structures in the application of energy saving coatings, namely, the difference between the thermal resistance of the glass pane and the low emission dispersion and without it, since the heat loss of the outer shell of the building occurs through window constructions due to their low values of heat transfer resistance. Also, the change in the light transmission capacity of window constructions is considered.

Built in a building model in the EnergyPlus software environment, which can be further used to analyze energy-efficient window constructions, as well as to study the effect of changing the design characteristics of double-glazed windows on the energy consumption of the building.

The aim of the work is to create a model of building with different types of glazing in the program for dynamic modeling of EnergyPlus and analysis of light and heat transmission of each of the presented types of double-glazed windows.

The object of the research is the processes of heat transfer through transparent translucent structures with the use of low-emission coatings, changes in the thermal load of the building due to the reflection of the infrared radiation are considered.

The results of the work were submitted to the Xth International Scientific and Practical Conference "Power Engineering. Ecology. Man ", May 26-27, Kyiv, 2018.

Keywords: low emission coating, energy saving glass, emission factor, infra-red thermal radiation, EnergyPlus modeling, translucent design, heat transfer resistance of a double-glazed unit.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, скорочень і термінів	6
ВСТУП.....	7
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ З ПИТАНЬ ЗАСТОСУВАННЯ	
ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ПОКРИТТІВ	10
1.1 Скло і його різновиди.....	10
1.2 Склопакет. Характеристики та різновиди.....	12
1.2.1 Умовні позначення.....	16
1.3 Енергозберігаючі покриття склопакетів	17
1.3.1 Історія розробки низькоемісійного покриття	17
1.3.2 Обґрунтування ефективності використання покриттів	19
1.3.4 Види низькоемісійного покриття	21
1.3.5 Заповнення міжскляного простору.....	27
1.3.6 Конструктивні характеристики склопакета.....	30
1.3.6 Критерії визначення енергоефективності склопакета.....	32
2 ОПИС ПРОЦЕСУ МОДЕЛЮВАННЯ ТА СТВОРЕННЯ ДОСЛІДНОЇ	
МОДЕЛІ.....	38
2.1 Застосування програмного забезпечення EnergyPlus для моделювання енергоспоживання будівель.....	38
2.2 Створення графічної моделі в Google SketchUp.....	45
2.3 Ведення вихідних даних	46
2.4 Проведення моделювання в середовищі EnergyPlus	48
2.5 Визначення оптимального СП	63
3. НАЯВНА ПРИЛАДОВА БАЗА.....	66

3.1 Прилади для вимірювання коефіцієнта емісії	66
3.2 Розробки вітчизняних науковців	67
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	72
4.1 Експериментальні дослідження для віконних склопакетів.	72
5 ІДЕЯ ВПРОВАДЖЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	83
ВИСНОВКИ	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	86
Додаток А	89

Перелік умовних позначень, символів, скорочень і термінів

Умовні позначення та символи

C – коефіцієнт випромінювання;
 ε – коефіцієнт емісії;
 α – коефіцієнт тепловіддачі;
 λ – коефіцієнт теплопровідності;
 R – опір теплопередачі;
 U – коефіцієнт теплопередачі;
 $t_{\text{вн.}}$ – внутрішня температура в приміщеннях будівлі;
 $t_{\text{ср.о}}$ – середня температура за опалювальний період.

Скорочення

ВК – віконна конструкція;
СП – склопакет;
СПО – однокамерний склопакет;
СПД – двокамерний склопакет;
СПТ – трикамерний склопакет;
ТРХ – терморадіаційні характеристики.

Терміни

Моделювання – це метод дослідження різних явищ і процесів, вироблення варіантів управлінських рішень. Моделювання ґрунтується на заміщенні реальних об'єктів їх умовними зразками, аналогами.

Енергоспоживання – кількість енергії, яка споживається об'єктом в одиницю часу.

Скло енергозберігаюче – скло з нанесеними на його поверхню сумішами тонких шарів металів, які відбивають електромагнітні хвилі в інфрачервоному секторі спектру.

ВСТУП

Актуальність теми

У сучасному світі людина постійно зіштовхується з проблемами збереження наявних ресурсів і їх економного використання. Ця проблема особливо актуальна в будівництві і зокрема в області скління.

Основним призначенням будь-якого вікна є забезпечення необхідної освітленості всередині приміщення і гарного огляду при підтримці комфортного для людини мікроклімату [1].

Застосування типових конструкцій з використанням звичайних скляних шибок не в належній мірі задовольняє цим вимогам. Так, в холодну пору року крізь таке вікно з приміщення втрачається суттєвий відсоток тепла, створюваного опаленням.

Простір безпосередньо поряд з вікном має нижчу температуру в порівнянні з іншою частиною приміщення. Фахівці називають це явище «ефектом холодної стіни». Запотівання, а нерідко і обмерзання скла при різкому пониженні температури – ще одна негативна властивість звичайного скління, яке погіршує огляд і освітленість приміщень, а також потребує постійного видалення конденсату з підвіконь і скла [2].

Існує декілька шляхів втрати тепла через скління. Перший з них – теплопровідність матеріалу. Зменшення втрат тепла, що відбуваються з цієї причини, досягається збільшенням числа застосовуваних в склінні листів скла, тобто створенням між склом повітряних прошарків, що мають більш низькі показники по теплопровідності, на відміну від скла. Другий шлях – конвекція, тобто теплообмін між склом і рухомими потоками повітря. Самий ефективний спосіб боротьби з втратами тепла через конвекцію – застосування в склінні склопакетів, які забезпечують створення герметичних внутрішніх камер заповнених інертним газом. Третій шлях витоку тепла – інфрачервоне випромінювання [2], вирішення саме цієї проблеми буде розглядатись в даній роботі.

Мета і задачі дослідження

Метою даної роботи є створення моделі будівлі з різними видами скління в програмі для динамічного моделювання EnergyPlus та аналіз світло- та теплопропускання кожного з представлених видів склопакетів. Відповідно до поставленої мети вирішуються такі завдання:

- створення моделі досліджуваної будівлі в програмному середовищі EnergyPlus;
- визначення тепловтрат та теплонадходжень будівлі застосувавши окремо взяті типи склопакетів з різними видами покриттів з використанням вітчизняних та європейських стандартів, а також програми EnergyPlus;
- порівняння результатів розрахунків енергоспоживання будівлі за різними методиками, включаючи EnergyPlus;
- визначення ефективності застосування кожного виду покриття та їх впливу на теплове навантаження.

Предмет дослідження

Предметом вивчення дисертації є зміна властивостей світлопрозорих конструкцій склопакетів при застосуванні енергозберігаючого "k" та "i" покриття.

Об'єкт дослідження

У даній роботі розглянуті процеси теплопередачі через світлопрозорі конструкції із застосуванням низькоемісійного покриття, зміна теплового навантаження будівлі за рахунок відбиття інфрачервоного випромінювання.

Наукова новизна одержаних результатів

У програмному середовищі EnergyPlus створена енергетична модель будівлі, на основі якої визначено енергоспоживання та питомі енергетичні показники будівлі для кліматичних умов м. Києва. Проаналізовано залежність зміни енергетичних показників склопакетів від виду застосованого покриття.

Методи дослідження

Відомі методи визначення опору теплопередачі віконних конструкцій та створення комп'ютерної моделі будівлі, що дозволить отримати результати, максимально наближені до реальних умов, комп'ютерне моделювання, експериментальні дослідження.

Практичне значення одержаних результатів

Створена в EnergyPlus модель будівлі може бути в подальшому використана для аналізу енергозберігаючих віконних конструкцій, а також для дослідження впливу зміни конструктивних характеристик склопакетів на енергоспоживання будівлі.

Особистий внесок магістра

Магістерська робота є результатом чисельного дослідження віконних конструкцій окремих типів за допомогою комп'ютерного моделювання для використання в будівельних розрахунках при виборі нового або заміні старого варіанту скління.

Апробація результатів дисертації

Основні положення та результати роботи доповідались на X міжнародній науково-технічній конференції «Енергетика. Екологія. Людина» на секції Енергетичний менеджмент та інжиніринг.

Публікація

БОНДАРЕНКО В.С., ВІНОГРАДОВ-САЛТИКОВ В.О., Ефективність застосування низькоемісійних покриттів в світлопрозорих конструкціях. Збірник доповідей X Міжнародної науково-технічна конференції "Енергетика, екологія, людина". 2018 р., м. Київ.

Структура і обсяг дисертаційної роботи

Дана магістерська дисертація складається зі вступу, п'яти розділів основної частини, висновків та списку використаних літературних джерел. Повний обсяг роботи складає 92 сторінки, включає у себе 49 рисунки, 13 таблиць, 27 джерел в переліку посилань та 1 презентацію.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ З ПИТАНЬ ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ПОКРИТТІВ

1.1 Скло і його різновиди

Скло – це один з основних матеріалів, застосовуваних у будівництві. Основними компонентами, що утворюють скло, є кварцовий пісок (69-74 %); сода (12-16 %); вапняк і доломіт (5-12 %) і в невеликих процентних співвідношеннях деякі інші компоненти. Якщо точніше, то до склоутворюючих речовин відносяться: оксиди – Si_2 , B_2O_3 , P_2O_5 , Te_2 , Ge_2 ; фториди – Al_3 та інші.

Крім основних сировинних складових використовуються також різні добавки, наприклад, що б пофарбувати скло в бажаний колір або для зміни інших властивостей скла.

Щоб одержати листове скло, в основному застосовують флоат-метод. При цьому процесі скло надходить із печі плавлення у вигляді плоскої стрічки, а потім через ванну з розплавленим оловом іде на подальше охолодження й віджиг. Перевагами флоат-методу, у порівнянні з іншими, є:

- стабільна товщина скла;
- висока якість поверхні, що не потребує подальшого полірування;
- відсутність оптичних дефектів;
- висока продуктивність [3].

До основних видів скла можна віднести:

- **листове скло** – основний матеріал, що використовується для виготовлення скляних дверей, перегородок, душових кабін, дверей у шафу купе або окремих елементів інтер'єра. Скло випускається восьми марок товщиною від 2 мм до 19 мм;

- **армоване листове скло** – листове скло, усередині якого паралельно поверхні покладена металева сітка із крученого або звареного відпаленого, хромованого або нікельованого сталевих дроту діаметром 4, 5-6 мм із шестикутними або квадратними осередками. Його використовують в

облаштуванні ліхтарів верхнього світла, перегородок з підвищеними запитами до безпеки й вогнестійкості застосування, огорожень сходових маршів, балконів. Хвилясте армоване скло використовують у покрівельних конструкціях. До армованих стекол також відносять триплекс. Триплекс – це один з видів безпечного скла, що представляє собою скло із двох або більше шарів, «склеєних» разом за допомогою спеціальної ламінуючої плівки (плівковий триплекс) або ламінуючої рідини (залитий триплекс). Тому триплекс також називають ламінованим або багатошаровим склом;

- **багатошарове скло** – складається із двох або більше стекол, склеєних між собою полімерною плівкою або ламінуючої рідиною. У той час, ламіноване скло не втрачає властивостей листового скла, а тільки надає йому міцності, надійності й безпеки. До таких стекол можна віднести ударостійке скло або кулестійке скло;

- **укріплене скло** – являє собою листове скло, піддане спеціальній термічній обробці, у результаті чого воно здобуває поліпшені властивості (міцність, термостійкість, безпека). Загартоване скло застосовують для безпечного застосування світлопрозорих будівельних конструкцій (скляні двері, скляні вітрин магазинів, скляні офісні перегородки, скляні душові кабінки, скляні козирки й т.д.), фасадного застосування (балконів і лоджій), а також для виготовлення вишуканих меблів [3];

- **пофарбоване в масі скло** – виготовляється із сировинних матеріалів, у які додаються різноманітні речовини для одержання потрібного кольору. Пофарбовані в масі стекла відомі також як сонцезахисні стекла або абсорбуючі стекла, тому що ці стекла поглинають і абсорбують, самі по собі більше сонячної теплової енергії й світла, ніж звичайне прозоре скло;

- **сонцезахисне (селективне)** – це загальна назва, що дана склу, що має здатність знижувати пропускання світлової й/або сонячної теплової енергії. Такими стеклами вважаються, наприклад, пофарбовані в масі стекла, різноманітні стекла з покриттями (стекла з покриттями типу On-line і Off-line) [4];

- **енергозберігаюче скло** – скло з нанесеним на поверхню низькоемісійним оптичним покриттям, що забезпечує збереження тепла в приміщеннях. Рекомендується для приміщень із підвищеними вимогами до захисту від інфрачервоних променів [3].

Щільність скла досить велика 2500 кг/м^3 , тому при невеликих габаритах скло має значну масу [5]. Основні марки скла перераховані нижче (таблиця 1.1)

Таблиця 1.1 – Марки стекол за ДСТУ Б В.2.7-107:2008

Найменування виду скла		Марка скла
Листове		M1.M2, M7
Армоване		A
Багатошарове:	ударостійке	P1A, P2A, P3A, P4A, P5A
	стійке до пробивання	P6B, P7B, P8B
	безпечне	CM1, CM2, CM3, CM4
Забарвлене в масі		T
Укріплене	хімічно	X
	загартованне	Z
Сонцезахисний (селективне)		C
Енергозберігаюче (низькоемісійне)	тверде покриття	k
	м'яке покриття	i

1.2 Склопакет. Характеристики та різновиди

Склопакети – об'ємні вироби, що складаються з двох або трьох листів скла, з'єднаних між собою по контуру за допомогою дистанційних рамок з металу або пластику та герметиків, утворюючи одну чи більше ізольованих від зовнішнього повітря камер, що заповнені висушеним повітрям або іншим газом [6].

Прийнято вважати, що чим товщі склопакет і чим більше в ньому камер, тим він тепліше, але це не завжди так. Аркуші скла, які використовують для склопакетів, можуть мати різну товщину від 2 мм і вище до декількох сантиметрів. Кількість шибок в склопакеті впливає на його прозорість. Важливо

знати, що чим більше шибок і чим більше їх товщина, тим менше в цілому прозорість склопакета [5].

Склопакети повинні забезпечувати пропускання максимальної кількості світла і, при цьому, мінімально впливати на витрати енергії на обігрів або охолодження приміщення. Застосування скла з різним функціональним призначенням дозволяє отримувати сучасний склопакет з різними функціональними характеристиками (рисунк 1.2.1) [7].

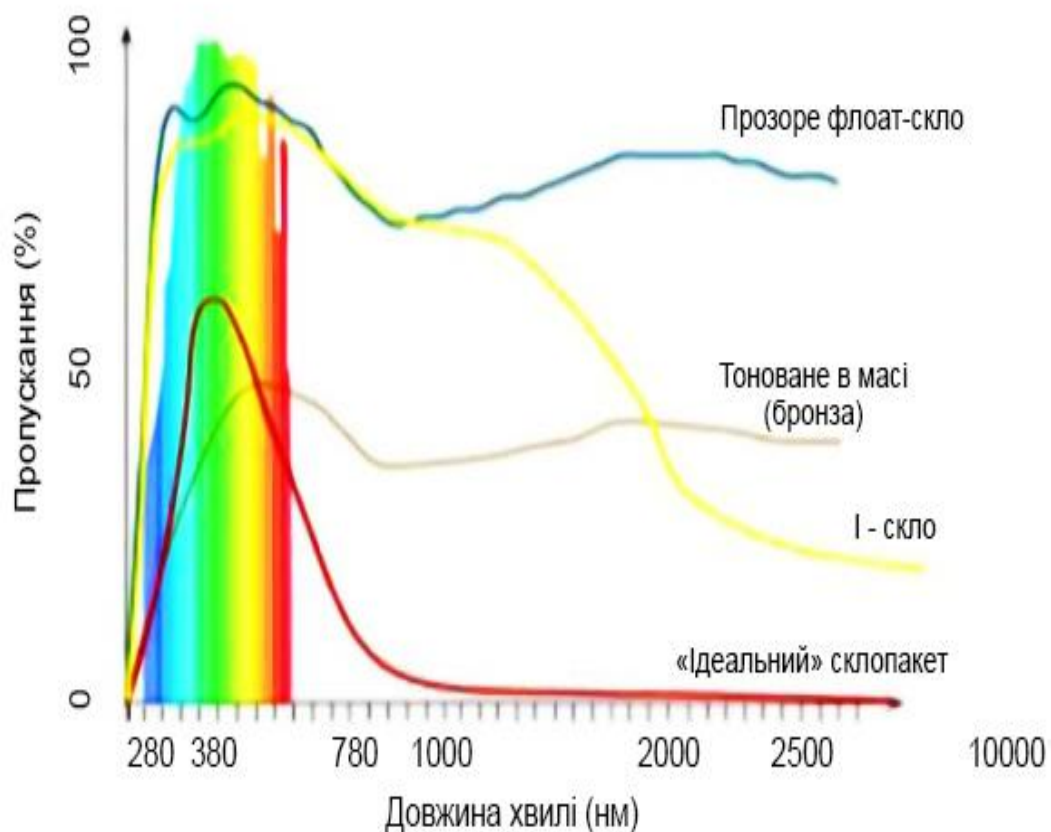


Рисунок 1.2.1 – Приклади скла з різним функціональним призначенням

У відповідності до [8], приведена класифікація найчастіше застосовуваних склопакетів:

1. Склопакети в залежності від кількості камер поділяють на типи:
СПО – однокамерні;

СПД – двокамерні;

СПТ – трикамерний.

Типи і конструкцію склопакетів наведено на рисунку 1.2.2.

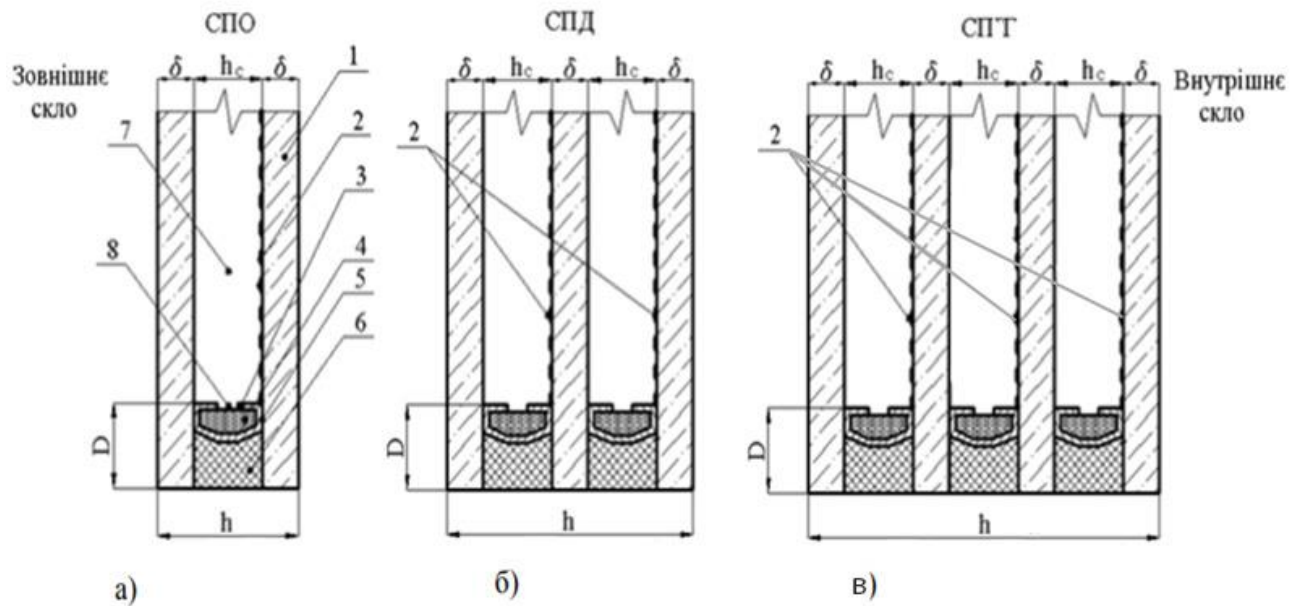


Рисунок 1.2.2 – Типи і конструкції склопакетів.

а) однокамерний склопакет, б) двокамерний склопакет, в) трикамерний склопакет. 1 – скло; 2 – рекомендовані варіанти розташування низькоемісійного покриття у разі його застосування; 3 – дистанційна рамка; 4 – вологопоглинач; 5 – нетверднучий герметик; 6 – тверднучий герметик; 7 – повітряний прошарок (міжскляна відстань); 8 – дегідративні отвори; δ – товщина склопакета; h_c – відстань між стеклами; D – глибина герметизуючого шару.

Допускається за узгодженням виробника зі споживачем виготовляти склопакети з чотирьох та більше плоских листів скла [9].

Однокамерний склопакет. Склопакети, ціна яких є досить низькою, складаються з двох стекол та рамки. Такі склопакети є якісним економ варіантом. Зазвичай скло для такої конструкції використовується лише високоякісне, камера є герметичною. Якщо камеру склопакету заповнити теплоізолюючим матеріалом – наприклад, інертним газом, така конструкція дозволить зберегти до

5% коштів за опалення. У будь-якому разі, таке вікно служитиме набагато краще, ніж звичайне скло.

Двокамерний склопакет. Такий склопакет складається з трьох стекол та захисної герметичної рамки. Скло для склопакету буває різної товщини – від цього теж залежить ціна та якість конструкції. Зрозуміло, що чим товще буде скло, тим надійніше приміщення буде захищене від стороннього проникнення, від вуличного галасу та негоди. Така конструкція збереже тепло і затишок оселі.

Двокамерні склопакети стали полярними, адже теплозбереження є актуальною темою. Але якщо повітряну камеру склопакету заповнити аргоном або сухим повітрям, то це забезпечить покращення енергетичних характеристик склопакета. Двокамерні склопакети мають лише один недолік. Розташовані в одній рамці три скла досить сильно резонують. Щоб цього уникнути, виробники почали розташовувати скло у склопакеті на різній відстані одне від одного. Таким чином, ефект резонансу було повністю ліквідовано [10].

2. Склопакети в залежності від призначення поділяються на види:

- склопакети загальнобудівельного призначення – виготовляють з листового скла;
- склопакети будівельного призначення із спеціальними властивостями;
- стійкі при механічній дії, або ударостійкі (Уд) – з використанням багатошарових захисних стекол, стекол із захисними плівками чи загартованих і хімічно зміцнених стекол;
- енергозберігаючі (Е) – з використанням енергозберігаючих стекол;
- сонцезахисні (С) – з використанням сонцезахисних стекол;
- морозостійкі (М) – склопакети, які призначені для використання у кліматичних умовах з температурою зовнішнього повітря $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- шумозахисні (Ш) – склопакети, призначені для захисту приміщень від зовнішнього шуму підвищеного рівня [11].

Особливим пунктом потрібно виділити окремі види (без застосування спеціальних покриттів) енергозберігаючих склопакетів:

- вакуумний склопакет;
- склопакети з електричним підігрівом (разом зі склопакетом встановлюється спеціальна скляна поверхня, яка містить рідкокристалічний прошарок, що підключається до електромережі).

Вакуумний склопакет – розробка дослідницького інституту по використанню сонячної енергії в США [7]. Впровадженню цих конструкцій заважають такі проблеми: 1 – руйнування вакуумного скла від вітрового навантаження, атмосферного тиску й різних температурних деформацій; 2 – випадання конденсату в місцях контакту скляних кульок зі склом.

Також відоме застосування ВК з електропідігрівом [8], або його ще називають енергетичне вікно. Такий склопакет є додатковим джерелом тепла, а в деяких випадках єдиним ефективним способом опалення приміщення різної площі. Особливо це актуально для мансардних вікон. Влітку енергетичне вікно працює в зворотному напрямку, охолоджуючи обслуговуване приміщення.

1.2.1 Умовні позначення

Згідно з джерелом [11] умовна позначка склопакета повинна складатись: із позначки типу, характеристики скла, що застосовується (вид скла та його товщина), відстані між стеклами, виду газонаповнення, висоти, ширини, товщини склопакета, виду склопакета та позначення даного стандарту [10].

Приклад умовної позначки однокамерного склопакета, який складається з двох листових стекол завтовшки 4 мм марки М-і згідно з ДСТУ Б В.2.7-122 (ГОСТ 111), з м'яким низькоемісійним покриттям на внутрішній поверхні скла, відстанню між стеклами 16 мм, заповненого аргоном, заввишки 1500 мм, завширшки 800 мм, завтовшки 24 мм, загальнобудівельного призначення: СПО 4 М1-16Аг-4і - 1500 х 800х 24 ДСТУ Б В.2.7-107-2008. Приклад умовної позначки двокамерного склопакета, який складається з трьох листових стекол завтовшки 4 мм-марки Мі згідно з ДСТУ Б В.2.7-122 (ГОСТ 111), з відстанню між стеклами 16 мм, заповненого повітрям, заввишки 1500 мм, завширшки 800 мм, завтовшки

36 мм, загальнобудівельного призначення. СПД 4 М1-16-4 М116-4 М1- 1500 х 800 х 36 ДСТУ Б В.2.7-107-2008. Приклад умовної позначки двокамерного склопакета, який складається з трьох листових стекол завтовшки 4 мм марки М- і згідно з ДСТУ Б В.2.7-122 (ГОСТ 111), з м'яким низькоемісійним покриттям на внутрішньому склі, відстань між стеклами 12 мм, заповнення; зовнішня камера - повітря, внутрішня камера — 42 аргон, заввишки 1500 мм, завширшки 800 мм, завтовшки 36 мм, морозостійкого, енергозберігаючого: СПД 4 М1- 12-4М1-12АГ- 4І - 1500х800 х 36 - МЕ ДСТУ Б В.2.7-107-2008.

Основними задачами сучасних склопакетів є те, що вони повинні забезпечувати пропускання максимальної кількості світла до приміщення, а також мінімізувати тепловтрати через склопакет [11].

1.3 Енергозберігаючі покриття склопакетів

1.3.1 Історія розробки низькоемісійного покриття

В статті [12] вказано, що о 1963 року про жодні покриття для стекол не знали. І тільки в 1964 році, компанія PPG випустила Solarban, світло і тепловідбивне покриття, які перешкоджали проникненню інфрачервоних променів і сонячних променів. Наявність такого покриття призвело до того, що будівлі кінця 1960-х і 1970 років остеклялись тільки за допомогою скла з такою поверхнею.

Наступний великий стрибок в галузі припав на енергетичну кризу 1970 років. Розробка нізкоемісійного скла почалася в Сполучених Штатах в 1976 році з партнерства між Лоренс Берклі Нешнел Лаборатори (Lawrence Berkeley National Lab) і компанією Southwall, що фінансується Міністерством енергетики США. Спільними зусиллями в 1981 було розроблено першу нізкоемісійне скло, а до 1988 року воно захопило 20% житлового сектора в Сполучених Штатах, за даними Міністерства енергетики США.

Низькоемісійне скло на своїй поверхні має нанопокриття, яке блокує інфрачервоне випромінювання, пропускаючи при цьому сонячне світло.

Промислове впровадження спектрально-селективного низькоемісійного скла зіграло не на користь енергоефективного скла.

В кінці 80-х і початку 90-х з'явилися м'яке (*i*-скло) і тверде (*k*-скло) покриття енергоефективних стекол.

Покриття поліпшувалися, завдяки виробникам, які впроваджували в низькоемісійним скла два шари срібла, а приблизно з 2005 року, три шари.

Компанії працювали над поліпшенням кольору і прозорості.

В останні роки скляна промисловість досягла значних результатів потенційного поліпшення в зниженні проникнення ультрафіолету і пропускання сонячного світла енергоефективним склом, статистика приведена на рис.1.3.1.



Рисунок 1.3.1 – Хронологія покращення параметрів скління [12]

1930 р. – Одинарне скло.

1950 р. – Двокамерні зварних склопакети.

1979 р. – Потрійні зварні склопакети.

1983 р. – Двокамерні склопакети з повітряним заповненням і низькоемісійним склом.

1987 р. – Двокамерні склопакети, заповнені аргоном і з низькоемісійним склом.

1995 р. – Двокамерні склопакети, заповнені аргоном, з низькоемісійним і сонцезахисним склом.

2005 р. – Двокамерні склопакети, заповнені повітрям, з низькоемісійним і сонцезахисним склом з срібним покриттям.

2014 р. – Двокамерні склопакети, заповнені повітрям з низькоемісійним і сонцезахисним склом з срібним покриттям, спеціально затемнене з синім / сірим відтінком.

2017 р. – Двокамерні склопакети, заповнені повітрям з динамічним склом максимально тонованим.

Скляні компанії співпрацюють з архітекторами для оптимізації виробництва скла в залежності від географічного розташування і орієнтації будівлі. Виробники в даний час працюють над іншою серією низькоемісійної продукції, яка забезпечить максимальний контроль над пропусканням сонячного світла для досягнення максимальної ефективності в статичних системах скління.

1.3.2 Обґрунтування ефективності використання покриттів

Відповідно представленій вище інформації стає зрозуміло, що крім двох камер з важким заповнюючим газом необхідно ще якимось додатковим інженерним рішенням, яке покращить теплозахисні властивості склопакета.

У статті [5] описується – якщо розглянути весь спектр сонячного випромінювання, то можна виділити три основні, які найбільше несуть теплове випромінювання. Це ультрафіолетовий спектр (10...380 нм), та видимий спектр (380...780 нм), інфрачервоне випромінювання (780...1000000 нм), що представлені на рисунку 1.3.2.

Інфрачервоний спектр за версією стандарту ISO 20473 розділяється на ще три:

- ближнє (коротке) інфрачервоне випромінювання – від 780 до 3000 нм;
- середнє (довге) інфрачервоне випромінювання – від 3000 до 50 000 нм;

- дальнє (довге) інфрачервоне випромінювання – від 50 до 1000 мкм.

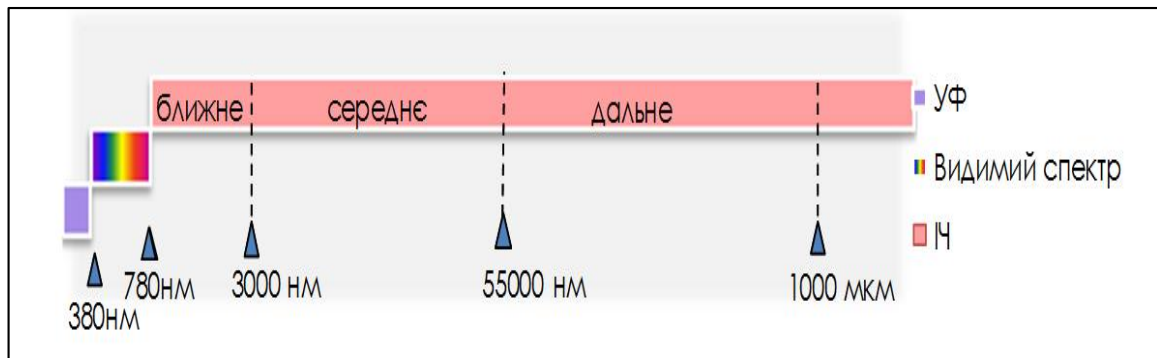


Рисунок 1.3.2 – Частина сонячного спектра випромінювання [5]

Звичайне силікатне скло пропускає тільки невелику частину ультрафіолетового випромінювання, починаючи від 320нм, повністю пропускає видимий спектр і частину інфрачервоного випромінювання (780...2000нм), пропускна здатність спектру від 2000 нм починає різко зменшуватися і вже спектр від 5000 нм звичайне скло практично не пропускає. Це означає, що проникнення крізь скло інфрачервоного спектра відбувається лише в частині короткохвильового або ближнього випромінювання (рис. 1.3.3).

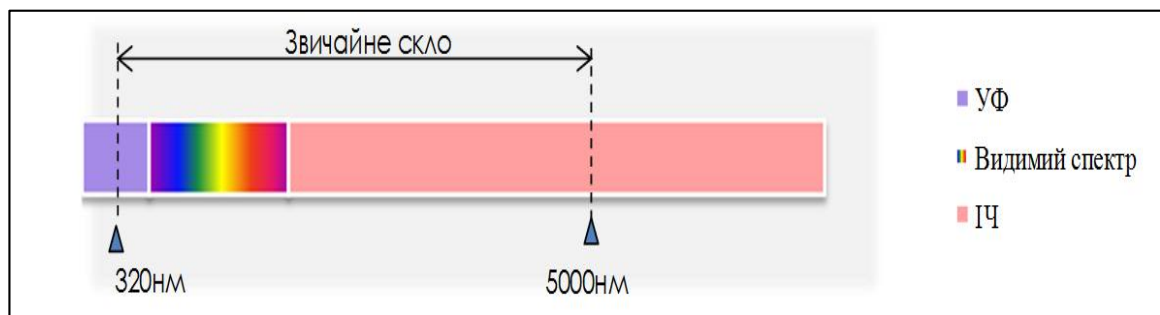


Рисунок 1.3.3 – Пропускна здатність звичайного силікатного скла

Тобто це і є те рішення, яке в змозі зменшити передачу тепла випромінюванням. Найбільш інтенсивне теплове випромінювання від літнього сонця не в повному обсязі проходить крізь скло, воно частково відбивається і поглинається склом, проте більша частина, це більше 70%, проходить далі.

Взимку найбільш інтенсивне випромінювання виходить з приміщення. Найбільша щільність випромінювання буде переважно в дальньому ІЧ діапазоні, яке не пропускається і добре поглинається склом. Такий стан речей призвів до використання вже давно відомого поєднання скла і металу, під назвою селективне скло (від англ. – selective / виборчий). Це скло здатне вибірково зменшувати пропускання певного спектру випромінювання. В даному випадку мова іде про енергозберігаюче світлопрозоре покриття скління. Ці шибки в зарубіжних аналогах позначаються як «Low-E" (Від англ. – low-emissivity / Низько-випромінюючі).

1.3.4 Види низькоемісійного покриття

За вказівкою автора [5] на вітчизняному ринку найбільше представлені енергозберігаючі селективні шибки з «k» та «i» покриттям.

Так зване **k-скло** має піролітичне покриття у вигляді шару оксиду олова. Воно наноситься на одну поверхню скла ще на етапі виготовлення, коли ще не охолола скляна маса рухається по конвеєру. Молекули оксиду, за рахунок сильного нагріву поверхні, переміщуються з молекулам скла якби запікаючись. Шар оксиду після охолодження скла не схильний до абразивного впливу, тому це покриття називається твердим покриттям.

i-скло має покриття нанесене методом вакуумного напилення декількома шарами, з чергуванням шарів діелектрика і срібла, але іноді замість срібла може використовуватися цинк або олово. Діелектриком часто виступають оксиди деяких металів. Залежно від кількості шарів срібла покриття має відповідну позначку (single, double або triple Low-E), тобто одинарне, подвійне або потрійне низькоемісійне покриття. На рисунку 1.3.4 зображено низько-емісійне покриття (triple Low-E) відзняте електронним мікроскопом (x 50 000 крат).

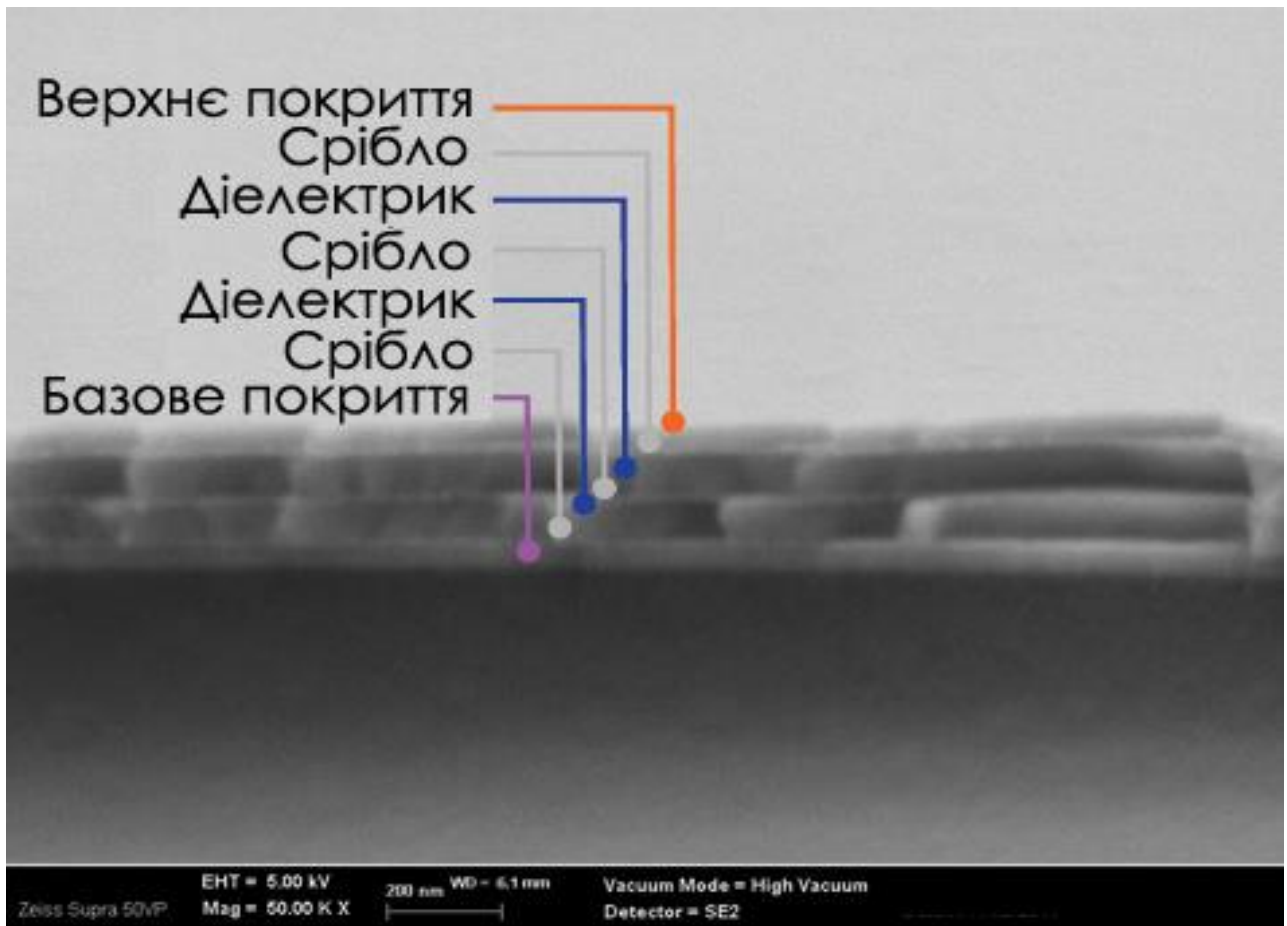


Рисунок 1.3.4 – Низькоемісійне покриття (triple Low-E) [5]

На рисунок 1.3.4 покриття (triple Low-E) відзняте електронним мікроскопом (х 50 000 крат). Загальна товщина покриття становить приблизно 250 нм, це близько 1/200-й товщини людської волосини.

Чим більше шарів срібла, тим сильніше це покриття буде знижувати передачу тепла випромінюванням. Таке покриття легко пошкодити, тому називається м'яким покриттям і зазвичай наноситься лише з одного боку, завжди зверненим всередину склопакета. Срібло, як і алюміній, має досить низький коефіцієнт випромінювання $C = 1,15-1,73 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$. Олово має трохи більш високе значення $C = 2,03 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$, але енергозберігаюча перевага *i*-скла в порівнянні з *k*-склом більш вагома. Значення коефіцієнта випромінювання *k*-скла $C=0,86...1,04 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$, а для *i*-скла (double Low-E) всього лише $C=0,12...0,35 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$. Коефіцієнт випромінювання таких покриттів строго

регламентований і визначається методом випробувань у поверхні з низько-емісійним покриттям згідно "EN 12898:2001 Glass in building - Determination of the emissivity" (адаптований аналог ГОСТ EN 12898).

Пропускний діапазон випромінювання у таких покриттів вужче ніж у звичайного скла (рисунок 1.3.5).

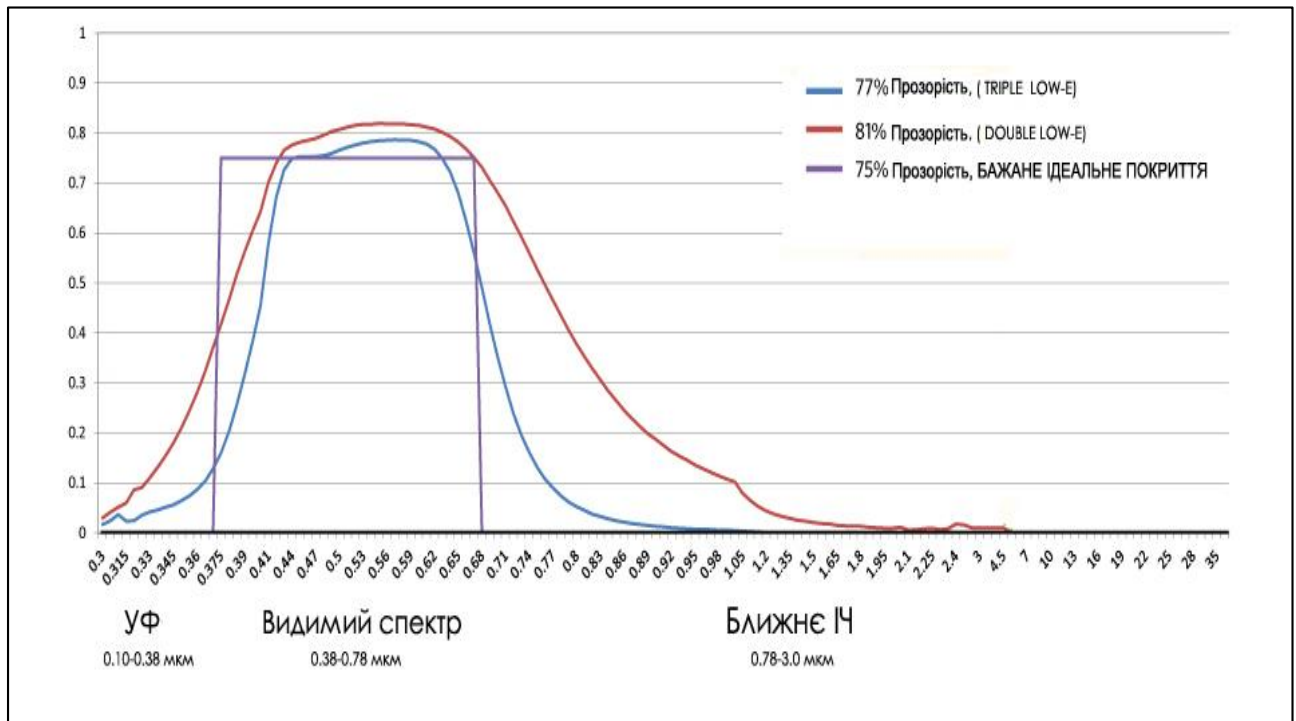


Рисунок 1.3.5 – Спектр Low-E покриття (double, triple) [5]

Як видно з спектрограми (рисунок 1.3.6) і-скло (double Low-E) пропускає випромінювання приблизно від 320 нм до 1500 нм, тобто частина короткохвильового інфрачервоного спектра все ж проходить через таке покриття. Так само воно частково блокує ультрафіолетовий спектр. Оптичні властивості Low-E скла злегка погіршуються, через незначний тонуючий ефект. Таке скло також надає екрануючі властивості і може створювати перешкоди для радіо, супутникового та стільникового зв'язку.

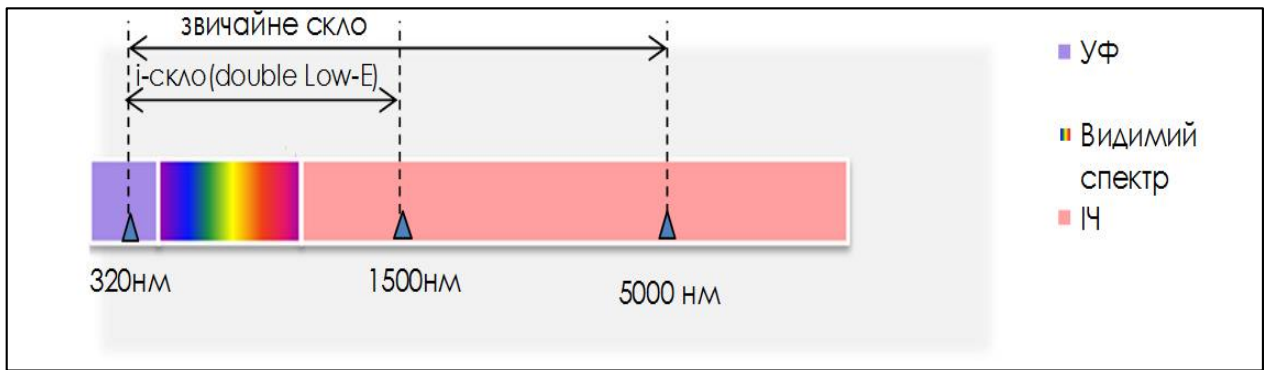


Рисунок 1.3.6 – Пропускна здатність звичайного і Low-E скла [5]

Теплоєфективність Low-E покриття набагато більша ніж використання важких газів в просторі між шибками. Наприклад, якщо порівняти два аналогічних двокамерних склопакета заповнених повітрям, але у одне з яких встановлено одне і-скло, то різниця в значеннях опору теплопередачі склопакетів R складе близько 30% з додаванням другого і-скла ця різниця складе вже 50%. На багатьох рекламних проспектах склопакетів з таким склінням можна побачити картинку, на якій теплове випромінювання відбивається від скла і повертається назад, але з точки зору фізики це не достовірно.

Селективне «Low-E» скло, насправді, зменшує теплопередачу випромінюванням, а не відбиває промені. Тобто служить «дамбою» для теплового випромінювання.

Це дуже важливо розуміти, тому що розташування селективного «Low-E» скла в склопакеті буде позначатися по різному на його теплозахисних властивостях. Так якщо розташувати скло зі сторони приміщення, селективної поверхнею зверненої до вулиці (рисунок 1.3.7), воно буде зменшувати лише те випромінювання яке буде направлене в бік вулиці, тобто теплове випромінювання опалення в зимовий період, а випромінювання сонця буде пропускати всередину.

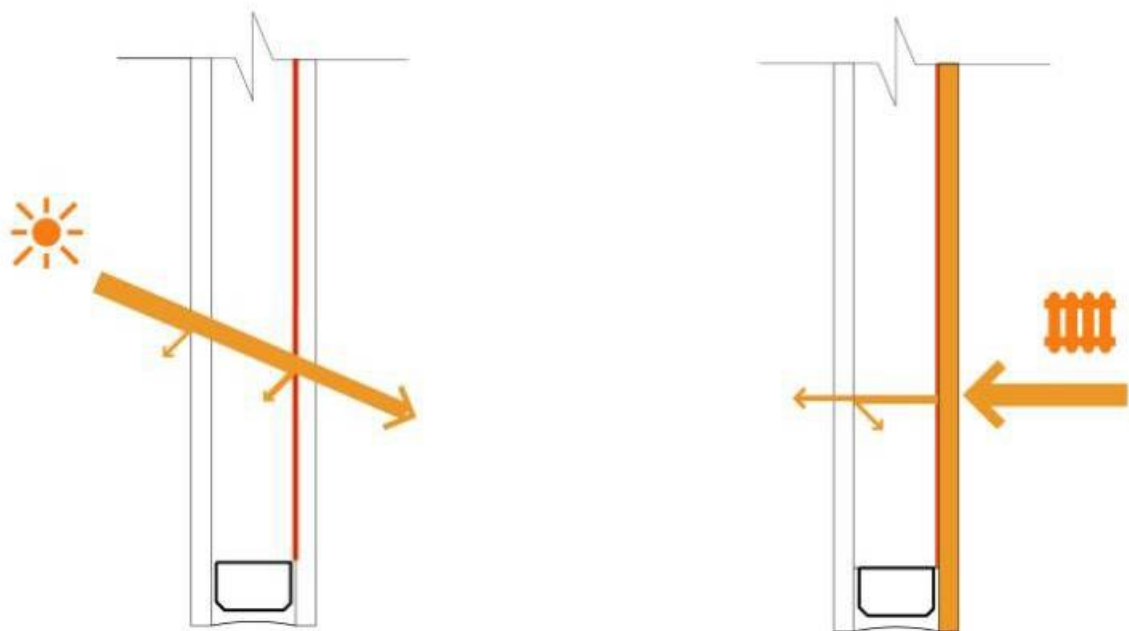


Рисунок 1.3.7 – Розташування low-е скла з боку приміщення

Цим досягається принцип енергопасивності, тобто зменшення витрат на опалення за рахунок енергозбереження і використання енергії сонця взимку. Влітку ж це скло практично ніяк не зупиняє дії випромінювання сонячних променів, з боку вулиці. Воно лише зовсім трохи відіб'є сонячне випромінювання в різних діапазонах. У зарубіжних аналогах таке скло називають (HSGglass від англ. – high solar heat gain). У європейських холодних кліматичних регіонах рекомендують використовувати склопакети з HSG glass, а саме з твердим селективним покриттям. І навпаки, якщо селективне скло розташувати з боку вулиці (рис.1.3.8), спрямоване низько-емісійною поверхнею у бік приміщення, то воно буде зменшувати пропускання сонячних променів склопакетом і майже не вплине на інфрачервоне випромінювання, що випливають з приміщення взимку. У зарубіжних аналогах таке скло називають (LSG glass від англ.- low solar heat gain). На цю роль часто рекомендують використовувати шибки з м'яким покриттям, які чинять сильнішу тепло-зупину дію. Таким чином стає

зрозумілим, що для даних типів енергозберігаючого покриття дуже важливо їх розташування в склопакеті (рисунок 1.3.8).

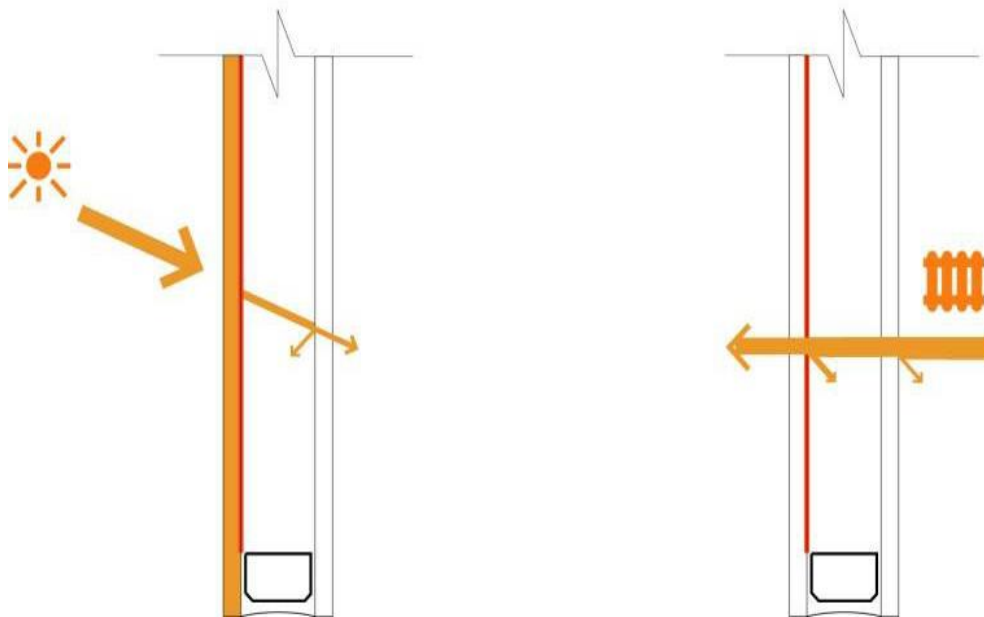


Рисунок 1.3.8 – Розташування low-e скла з боку вулиці

Шибки з Low-E покриттям можуть бути схильні до термошоку, тобто руйнування від сильного нагріву, і тому рекомендують використовувати Low-E тільки на термо-зміцнених або загартованих шибках. Ефективність такого скла значно більша, ніж газового прошарку в склопакеті.

Так, наприклад однокамерний склопакети із заповненням міжшибкового простору повітрям і з одним і-склом більш енергоефективний, ніж аналогічний двокамерний склопакет з таким же заповненням, але без такого скла.

З цього можна зробити висновок, що в сучасному склопакеті Low-E скло повинно бути неодмінним атрибутом, але важливо знати, що у нас в Україні не регламентується використання Low-E шибок для різних типів приміщень, а наприклад, у Російській Федерації їх використання дозволено крім лікувально-профілактичних, дитячих навчальних закладів, а також житлових приміщень. На мій погляд, це пов'язано з низькою пропускнуою здатністю Low-E шибок «ультрафіолетового випромінювання А» (з довжиною хвилі 320-380нм), а разом

з цим і зменшенням дії інсоляції, тобто прямого попадання сонячного світла в приміщення через вікна протягом певного часу. Поряд з тим існують більш досконалі покриття у вигляді складних полімерних багатошарових плівок, ефективність яких більша, ніж у вищевказаних покриттів, але на вітчизняному ринку вони, на даний момент представлені дуже мало [5].

1.3.5 Заповнення міжскляного простору

Наповнення камер вимагає високої герметичності, яка досягається в більшості сучасних пакетів використанням герметиків з двокомпонентних поліуретанів або полісульфідів. Перевага інертних газів полягає в їх більшій в порівнянні з повітрям щільності і в'язкості, а також більш низькому коефіцієнті теплопровідності. Якщо коефіцієнт теплопровідності у сухого повітря при 0°C , $\lambda = 0,026$ (Вт/(м $\cdot^{\circ}\text{C}$)), то у аргону $\lambda = 0,0165$ (Вт/(м $\cdot^{\circ}\text{C}$)), і у криптоні $\lambda = 0,0096$ Вт/(м $\cdot^{\circ}\text{C}$). Тобто інертні гази значно гірше проводять тепло ніж повітря. Збільшена в'язкість інертного газу уповільнює конвекцію. Показники ефективності роботи газових прошарків залежить від стандартів проведення випробувань і розрахунків, які можуть відрізнятись. Наприклад, у США вимірювання проводять згідно умов NRFC стандарту. Температура в випробуваннях зовнішнього повітря становить -18°C , і внутрішнього 21°C , а розрахунки ведуть згідно ISO 15099. У європейських нормах використовують умови випробувань з іншими температурними значеннями. Температура зовнішнього повітря становить 0°C , а внутрішнього 20°C , а для розрахунків використовується документ EN 673:2011 Glass in building. Determination of thermal transmittance (U value). Calculation method.

Адаптована версія документа для нашої країни називається ДСТУ EN 673: 2009 «Скло будівельне. Методика визначення коефіцієнта теплопередачі багатошарових конструкцій». На рисунках 1.3.9 та 1.3.10 представлено графіки залежності ефективності коефіцієнта теплопередачі U_g однокамерного і

двокамерного склопакетів від ширини міжскляної відстані і заповнює газу згідно EN. 673: 2011

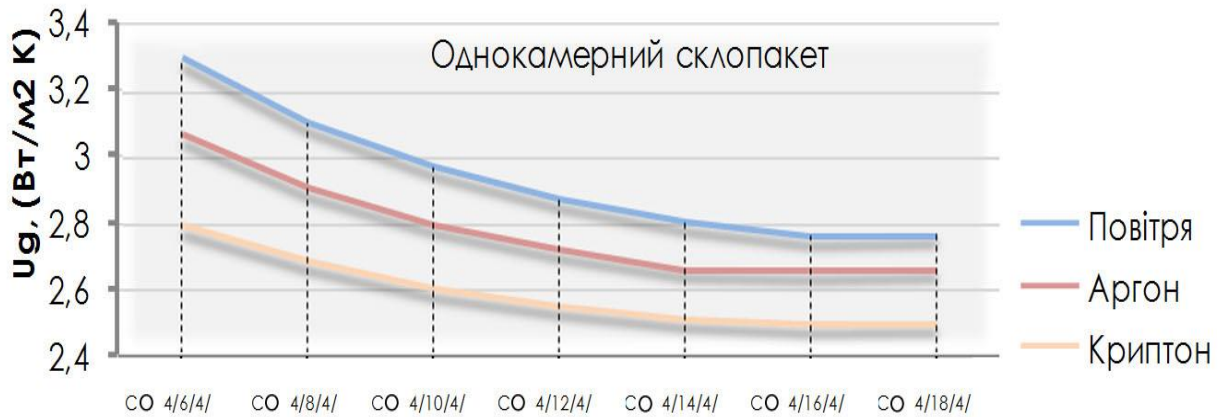


Рисунок 1.3.9 – Значення теплопередачі для однокамерних склопакетів

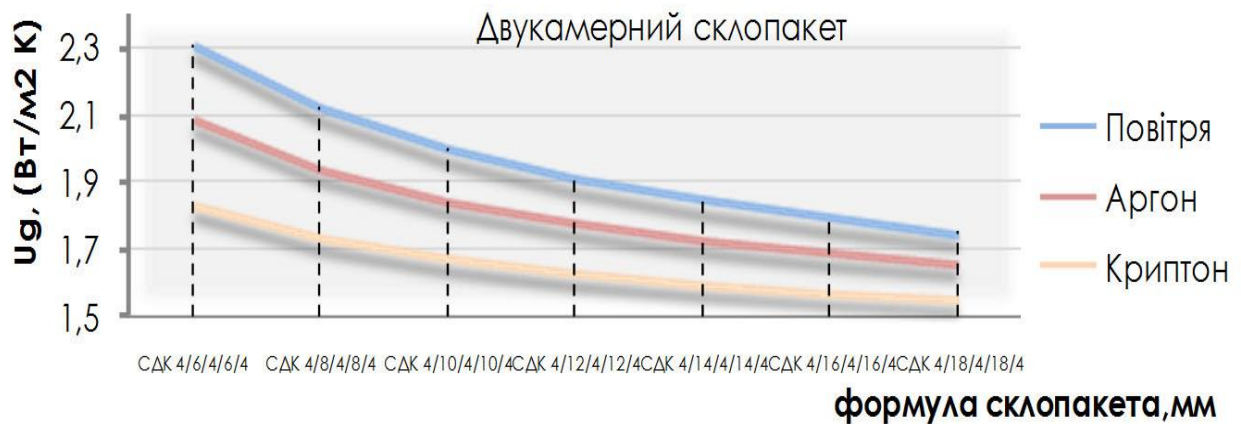


Рисунок 1.3.10 – Значення теплопередачі для двокамерних склопакетів

З графіка (рис. 1.3.10) видно, що і для однокамерного і для двокамерного склопакета використання інертних газів покращує їх енергоефективність, однак різниця значень коефіцієнта теплопередачі в міру збільшення міжшибкової відстані падає. Також важливо відзначити, що паралельно відбувається тенденція до зменшення різниці значень між інертними газами і повітрям. Так наприклад, різницю величин опору теплопередачі між двома однаковими

двокамерними склопакетами з розміром дистанційної рамки 8мм, заповненими в одному випадку повітрям і в другому криптоном, складе близько 17%.

Найбільший оптимальні параметри мають ДСП виготовлені із двох енергозберігаючих стекол із заповненням камер інертним газом (таблиця. 1.3.1).

Таблиця 1.3.1 – Приведений опір теплопередачі склопакетів

Кількість камер у склопакеті	Варіанти скління*	Товщина, мм	Повітря	Криптон	Аргон	Опір теплопередачі $\text{m}^2\text{K}/\text{Вт}$	Опір теплопередачі, %
1	4M1-16-4i	24		100		0,75	100,0
2	4M1-12-4M1-12-4i	36			100	0,75	100,0
2	4M1-10-4M1-10-4K	32		25	75	0,78	104,0
2	4M1-10-4M1-10-4i	32		25	75	0,78	104,0
2	4M1-10-4M1-10-4K	32		50	50	0,8	106,7
2	4M1 -10-4M1 -10-4K	32		75	25	0,82	109,3
2	4M1 -10-4M1 -10-4K	32		100		0,85	113,3
2	4M1-10-4M1-10-4i	32		50	50	0,85	113,3
2	4M1-10-4M1-10-4i	32		75	25	0,9	120,0
2	4i-10-4M1 -10-4i	32	100			0,93	124,0
2	4M1-10-4M1-10-4i	32		100		0,94	125,3
2	4i-10-4M1-10-4i	32		25	75	1,14	152,0
2	4I-10-4M1-10-4i	32		50	50	1,18	157,3
2	4Mr10-4K-10-4K	32		100		1,28	170,7
2	4i-10-4M1 -10-4i	32		75	25	1,28	170,7
2	4K-10-4M1-10-4K	32		100		1,32	176,0
2	4i-10-4M1-10-4i	32		100		1,35	180,0

При збільшенні дистанційної рамки до 18 мм ця різниця складе вже 11%. Це пов'язано з тим, що інертні гази та повітря зменшують передачу тепла тільки теплопровідністю і конвекцією, для випромінювання перераховані вище гази і газові суміші прозорі. Випромінювання проходить крізь них легко, не

зменшуючись. Зі збільшенням товщини газового прошарку випромінювання починає відігравати більш значну роль. Так у склопакета з дистанційною рамкою не менше 10мм передача тепла випромінюванням становитиме до 70%.

Важливим буде відзначити, що навіть для двокамерного склопакета з дистанційною рамкою 18мм і заповненням міжшибкового простору криптоном, коефіцієнт теплопередачі складає $U_g = 1,56 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, тобто опір теплопередачі буде дорівнювати приблизно $R = 0,64 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)}/\text{Вт}$, що задовільняє умови другої температурної зони. Номінальне значення опору теплопередачі вікна для першої температурної зони має скласти не менше $R = 0,75 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)}/\text{Вт}$ [2].

1.3.6 Конструктивні характеристики склопакета

При проектуванні світлопрозорих огорожувальних конструкцій повинні бути вирішено наступні завдання шляхом забезпечення:

- звукоізоляційної здатності;
- теплоізоляційної здатності;
- світлопропускної здатності;
- повітропроникнення;
- паропроникнення;
- водонепроникнення;
- стійкості до силових навантажень від вітру та вилому [13].

Вплив повітряного і теплового напору, опадів, сонячного тепла або холоду, а також шуму з однаковою силою діє як на стіни так і на вікна. Вікна значно тонші в порівнянні зі стіною і більш уразливі, тому вони є предметом дуже серйозної інженерної розробки. У нинішній час, для оцінки різних зовнішніх впливів на вікна ми найчастіше стикаємося з номенклатурою європейських будівельних норм (єврокодів DIN EN). Це й не дивно, адже практично всі сучасні віконні технології були завезені з країн зарубіжжя. Як і у вітчизняній промисловості ці випробування проводять певні науково-дослідні лабораторії, такі наприклад як «ift Rosenheim» – (Міжнародний науковий центр випробувань

по придатності будівельної продукції). Основою випробувань є тест на витривалість різних впливів, які симулюють реальні явища. Розглянемо їх ближче.

Індекс зниження звуку (R_w) він відображає здатність віконної системи знижувати шумове навантаження та виражається в децибелах (dB). Частота звукової хвилі для проведення випробувань становить найчастіше від 100 Гц до 3150 Гц. Така хвиля не враховує низькочастотні коливання і верхні частоти, адже людське вухо може сприймати частоту звуку від 16 до 22000 Гц, але по суті відображає основні звукові коливання які можуть заподіяти дискомфорт. Звуки між 16 і 100 Гц мають характер ударного походження, а звуки вище 3150 Гц це ті коливання, які перестають бути характерними основним частотам людської мови. R_w віконної рами не має абсолютного значення і залежить від звукоізоляційних якостей склопакета, встановленого у віконній системі, тому його показники можуть варіюватися десь в межах 2-10 dB.

Повітропроникність віконної системи (англ. - air permeability або air tightness) вимірює здатність конструкції пропускати температурний натиск повітря, що виникає при різниці температур між внутрішнім і зовнішнім середовищем, а також вітровий натиск, що виникає від переміщення повітряних мас. Згідно норм єврокодів показники повітропроникності повинні відповідати одному з чотирьох класів. Максимальний тиск передбачений таблицею в 600 Па відповідає швидкості вітру 30 м/с на 1 м² площі, при щільності повітря в 1,2 кг/м³. За визначенням потужності це вітер, що виникає при сильній штормовій погоді.

Стійкість до вологопроникності (англ. - water tightness) вимірює можливість проникнення вологи в конструкцію під дією вітру, симулюючи, таким чином штормову погоду. Стійкість вимірюється значенням тиску повітря, що спрямовано на випробовуваний зразок при якому також подається через форсунки вода. Це відбувається протягом певного часу, що визначено тестом. Тест буде пройдено, якщо віконна система зберегла герметичність. Так наприклад, клас 9a відповідає тиску в 600 Па і відрізка часу в 55хв.

Опір вітровим навантаженням (англ.- wind load resistance) вимірює структурну міцність віконної системи під впливом натиску вітру. Тест проводиться з підвищенням тиску до втрати цілісності конструкції.

Максимальний тиск повітря для Class 5 відповідає 2000 Па. Така сила, що обрушується на 1м² випробувального зразку є еквівалентом швидкості вітру 60м/с при щільності повітря 1,2 кг/м³ і є по суті найсильнішим ураганом. Цей тест на пряму пов'язаний з стійкістю рами до прогину (англ.- bending of frame) від вітрового навантаження.

Як і у випадку з вологопроникністю, деякі вікна витримують і значно більші навантаження, ніж ті, що визначені таблицею. Вони так само позначаються через префікс «Е» і значенням тиску в Па, при якому віконна система ще зберігає свою структурну цілісність.

Розглянувши основні впливи можна зробити висновок, що вікна відповідають найвищим класам дійсно є неймовірно міцними і герметичними. Наприкінці цього розділу необхідно зазначити, що акустичні показники, а також показники повітря і вологопроникності для різних систем будуть залежати від кількості контурів ущільнення, а також багато в чому на ізоляційні показники вікна в цілому впливає якісна обв'язка стулки і рами з фурнітурою [5].

1.3.6 Критерії визначення енергоефективності склопакета

Для того, щоб розібратися в теплозахисних властивостях різних вікон і роботі склопакета необхідно розглянути способи передачі теплової енергії. Їх всього три.

Перший спосіб, це передача тепла теплопровідністю. Цей спосіб передачі тепла здійснюється в твердому, рідкому та газоподібному середовищах. Однак в чистому вигляді він спостерігається лише в суцільних матеріалах. У твердих тілах (діелектриках) і в рідинах енергія переноситься пружними хвилями, в газах – дифузією атомів або молекул, а в металах – дифузією електронів.

Другий спосіб – це **конвекція**, передача теплоти в газовому середовищі або рідині, за допомогою потоку рухомих частинок газу або рідини.

Третій спосіб – **випромінювання**, тобто передача енергії електромагнітними (інфрачервоними) хвилями в газовому або безгазовому середовищі. Випромінювання ще називають емісією.

Співвідношення передачі тепла між цими трьома способами зумовлена властивостями матеріалу і конструкції, наявністю або відсутністю в них замкнених газових пустот. Зазвичай в однорідних суцільних матеріалах тепло найбільше передається теплопровідністю. Передача теплоти в пустотних матеріалах, безпосередньо залежить від розміру пустот, їх розташування і кількості. Чим більше відсоткове співвідношення прошарків в матеріалі і чим більше їх товщина, тим сильніше тепло передається через конвекцію і випромінювання (рисунок 1.3.11). Зі збільшенням температури поверхні відсоткове співвідношення передачі тепла випромінюванням збільшується і навпаки [5].

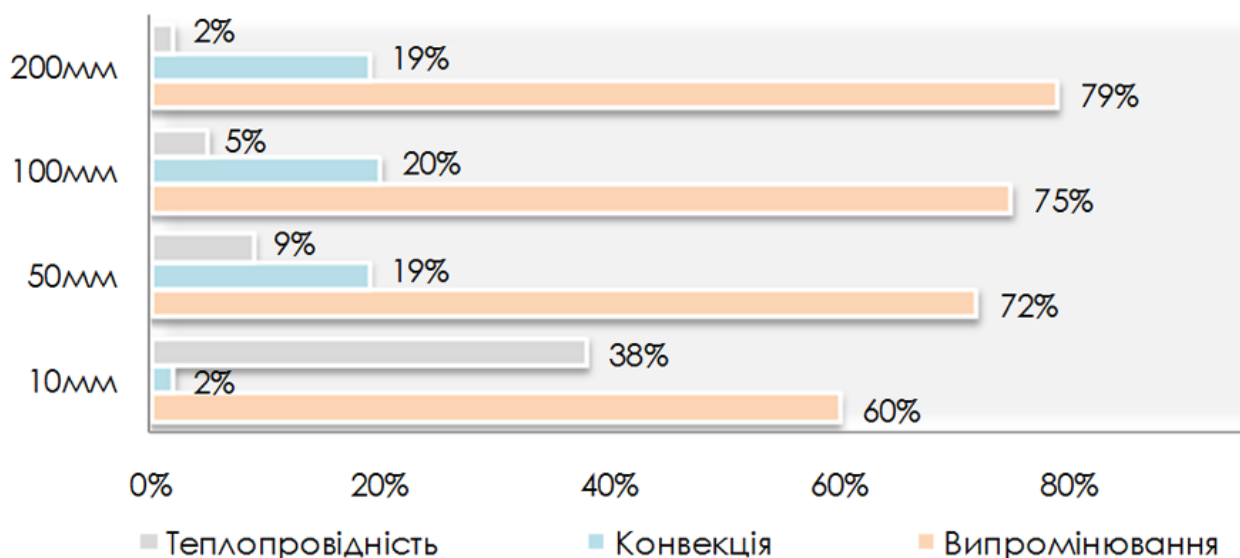


Рисунок 1.3.11 – Діаграма залежності способів передачі тепла в повітряному прошарку від його товщини

Варто додати, що в горизонтальних прошарках невеликої висоти передача теплоти конвекцією практично не здійснюється, а в невеликих по товщині вертикальних прошарках від 5 до 10 мм передача тепла конвекцією слабшає, тому що висхідний і спадаючі струми охолодженого і нагрітого газу в них гальмують один одного.

Якщо товщина вертикальної повітряного прошарку менше 5мм конвекція зникає зовсім. Товщина повітряного прошарку не сильно впливає на його опір теплопередачі (див.мал.6). Як видно з діаграми різниця між значеннями опору теплопередачі прошарків товщиною 10 мм і 150 мм особливо не відрізняється.

Це означає, що немає особливого сенсу робити великі по товщині повітряні порожнини, адже вони будуть мати практично такі ж самі теплозахисні властивості як і порожнини меншого розміру. А ось великий масив з невеликих порожнин може поліпшити теплозахист [5].

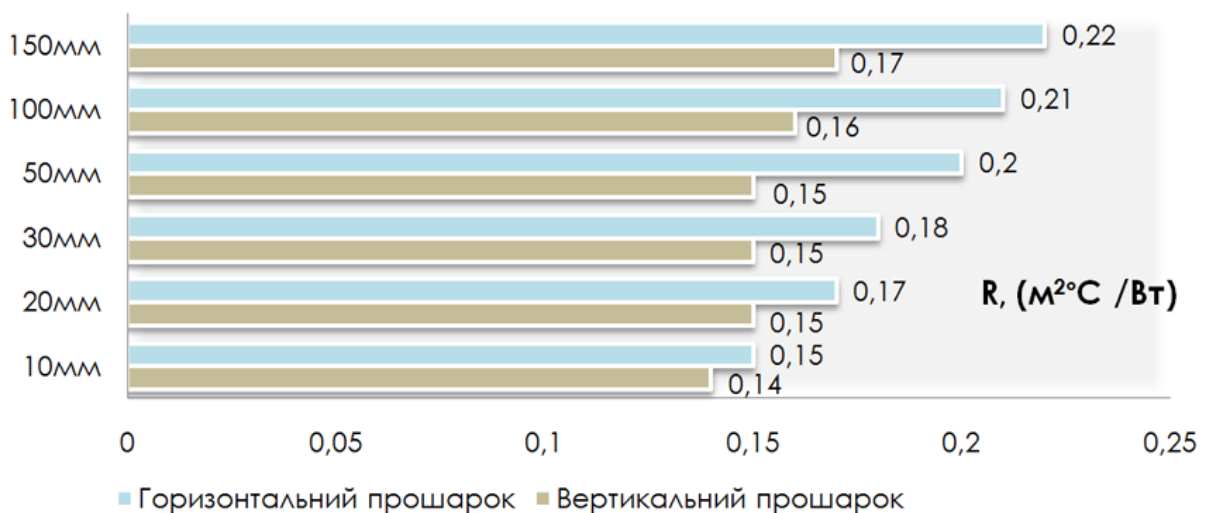


Рисунок 1.3.12 – Діаграма залежності опору теплопередачі повітряного прошарку R від його товщини

Важливими значеннями, що необхідні для оцінки властивостей матеріалу є:

- коефіцієнт теплопровідності – « λ » (Вт/(м·°C));
- коефіцієнт випромінювання – «C» (Вт/(м²·K⁴));
- коефіцієнт лінійного розширення – « α » (10-6 м/(м·K)).

Перший з них « λ » показує, наскільки добре конструкція проводить тепло через себе. Чим менше значення « λ », тим краще її теплоізоляційні властивості.

Другий « C » відображає властивості матеріалу передавати тепло інфрачервоним випромінюванням. Чим більше значення коефіцієнта « C », тим сильніше відбувається теплове випромінювання. Найбільше значення випромінювання, яке присвоєно так званому «абсолютно чорному тілу» становить $C = 5,77 \text{ (Вт/(м}^2 \cdot \text{K}^4))$

Третій " α " показує, наскільки сильно може збільшуватися матеріал при нагріванні. Давайте почнемо розгляд характеристик трьох різних матеріалів віконних систем.

Для визначення енергетичних показників енергозберігаючого склопакета задаються наступні параметри:

1. **U-factor** – це чисельне значення, яке демонструє загальний коефіцієнт теплопередачі « k » для кожного модуля конструкції. По суті U і k це одне і теж, тобто $U = k$. Не варто плутати коефіцієнт теплопередачі « k » і коефіцієнт теплопровідності « λ », вони мають схожі назви і обидва обернено пропорційні, але відображають різні величини. Розмірність коефіцієнту теплопередачі U або k , $(\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}))$ або $(\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}))$. Чим менше значення U , тим краще конструкція чинить опір втратам тепла.

Літерні позначення U – factor для різних модулів вікна наступне:

- U_f – це коефіцієнт теплопередачі віконної рами.
- U_g – це коефіцієнт теплопередачі склопакета.
- U_w – це загальний усереднений коефіцієнт теплопередачі вікна в цілому.

Оцінка теплозахисної ефективності модулів конструкції у вітчизняній індустрії часто здійснюється показником загального опору теплопередачі R , $((\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт})$. Це значення визначає наскільки добре матеріал або конструкція чинить опір передачі тепла, що проходить крізь нього. Чим більше значення R тим краще конструкція чинить опір втратам тепла.

2. **R-VALUE** – коефіцієнт опору теплопередачі.

3. **SHGC** (Solar Heat Gain Coefficient) – коефіцієнт нагрівання скла сонячними променями. Показує кількість сонячного тепла, яке проходить через скло всередину приміщення. Іншими словами, чим нижче SHGC скла, тим менше тепла воно пропускає. У країнах з жарким кліматом цей коефіцієнт повинен бути невеликим (показник близько 40% є цілком хорошим), а країнах з холодним кліматом він може бути вищим.

4. **VT** (від початкового Visual Transmittance – оптична проникність). Вона показує нам відсоток сонячної енергії, що поглинається поверхнею скла, і кількість денного світла, яке ми здатні побачити неозброєним оком. Якщо ми хочемо, щоб приміщення було якомога більше світлим, ми повинні вибрати скла, показник VT яких коливається від 60% до 80%.

5. **LSG** (Light to Solar Gain) – коефіцієнт, що вимірює здатність скла пропускати через себе сонячне світло, не пропускаючи при цьому сонячного тепла. Цей показник виходить від ділення VT (оптична проникність) на SHGC (коефіцієнт нагріву). Якщо частка від ділення більше одиниці, це означає, що скло з падаючого на нього сонячного випромінювання пропускає більше світла, ніж тепла [5].

Висновок до розділу 1

Проаналізувавши матеріали, можна з впевненістю стверджувати, що склопакети з нанесення енергозберігаючих покриттів є досить привабливою інвестицією. Окрім зменшення втрат тепла через світлопрозорі конструкції, що в свою чергу становлять близько 40% всіх тепловтрат будівлі, також можна отримати значний відсоток економії енергоресурсів використаних на опалення/кондиціонування приміщення. Економічний ефект проявляється головним чином в здатності блокувати прохід теплового випромінювання від приладів обігріву через вікна з середини приміщення в навколишнє середовище, цим самим зменшуючи споживання теплової енергії в опалювальний сезон. Так

само дане покриття може мати властивості відбивання теплонадходжень від прямих, відбитих або розсіяних сонячних променів, чим запобігають перегріву приміщення в літні місяці і дозволяють знизити навантаження на кондиціонування внутрішнього повітря.

Застосування даного матеріалу майже не впливає на пропускання сонячного світла в середину будівлі та не змінює оптичних характеристик видимої частини спектра, що в протилежному разі може бути наслідком погіршення зору.

Актуальні критерії, за якими можна буде проаналізувати конструкції наступні:

- вплив зовнішніх атмосферних чинників на роботу конструкції. Методики випробувань;
- енергоефективність конструкції;
- вплив якості монтажу на теплозахисні властивості вікон;
- будова склопакетів та спеціалізовані покриття;
- економічна доцільність [13].

На сьогодні існує величезна маса різновидів компонування енергозберігаючих покриттів, вони використовуються, як плівки для нанесення на вже встановленні склопакети з метою зменшення витрат на повну заміну світлопрозорих конструкцій, так і при виготовленні нових склопакетів у вигляді напилення для покращення теплофікаційних характеристик конструкцій.

Під впливом попиту з боку будівельного спільноти, підвищення цін на енергоносії і жорсткості вимог до використання енергії, виробники скла орієнтуються на розробку більш ефективних світлопрозорих рішень. Енергоефективна скляна промисловість завтрашнього дня буде представлена підвищеною динамікою, потрійними склопакетами, новим низькоемісійним склом (включаючи новий четвертий шар поверхні) і технологіями, спрямованими на збереження тепла [12].

2 ОПИС ПРОЦЕСУ МОДЕЛЮВАННЯ ТА СТВОРЕННЯ ДОСЛІДНОЇ МОДЕЛІ

2.1 Застосування програмного забезпечення EnergyPlus для моделювання енергоспоживання будівель

У даній роботі, моделювання будемо проводити за допомогою програмного середовища EnergyPlus, що являє собою набір компонентів симуляції енергії в будівництві, яку інженери, архітектори та дослідники використовують для моделювання як споживання енергії – для опалення, охолодження, вентиляції, освітлення, а також для визначення навантаження на систему водопостачання.

EnergyPlus є однією з найбільш передових загальнодоступних програм для моделювання енергоспоживання. Дана програма використовує кращі риси двох відомих засобів моделювання DOE-2 та BLAST, методики розрахунків в яких наближені до європейських стандартів. Порівняння даних програмних засобів проводиться в статті [14]. Зокрема, в цій статті говориться про те, що кожна така програма включає в себе сотні підпрограм, які працюють разом, щоб моделювати теплові та масові енергетичні потоки по всій будівлі. В одних випадках підпрограми в DOE-2 були більш точні, в інших – підпрограми в BLAST. Щоб не підтримувати обидві програми, що є економічно не вигідно, та об'єднати їх ресурси та кращі можливості і особливості в одному програмному засобі, у 1996 році DOE взяла на себе ініціативу розробки нової програми під назвою EnergyPlus. Було визнано, що програма на повністю новому структурованому коді коштуватиме менше, а змінювати та розширювати її можливості буде легше.

У статті [15] розглядається структура програми EnergyPlus. Згідно цієї статті комплексне моделювання є основною концепцією EnergyPlus. Програма складається з трьох основних компонентів моделювання: модуль теплового і масового балансу (Heat and Mass Balance Simulation); модуль симуляції систем будівлі (Building Systems Simulation Manager) та сторонній інтерфейс для

створення геометрії будівлі (Third-Party Interfaces) (рисунок 2.1.1). Менеджер моделювання (EnergyPlus Simulation Manager) контролює весь процес моделювання.

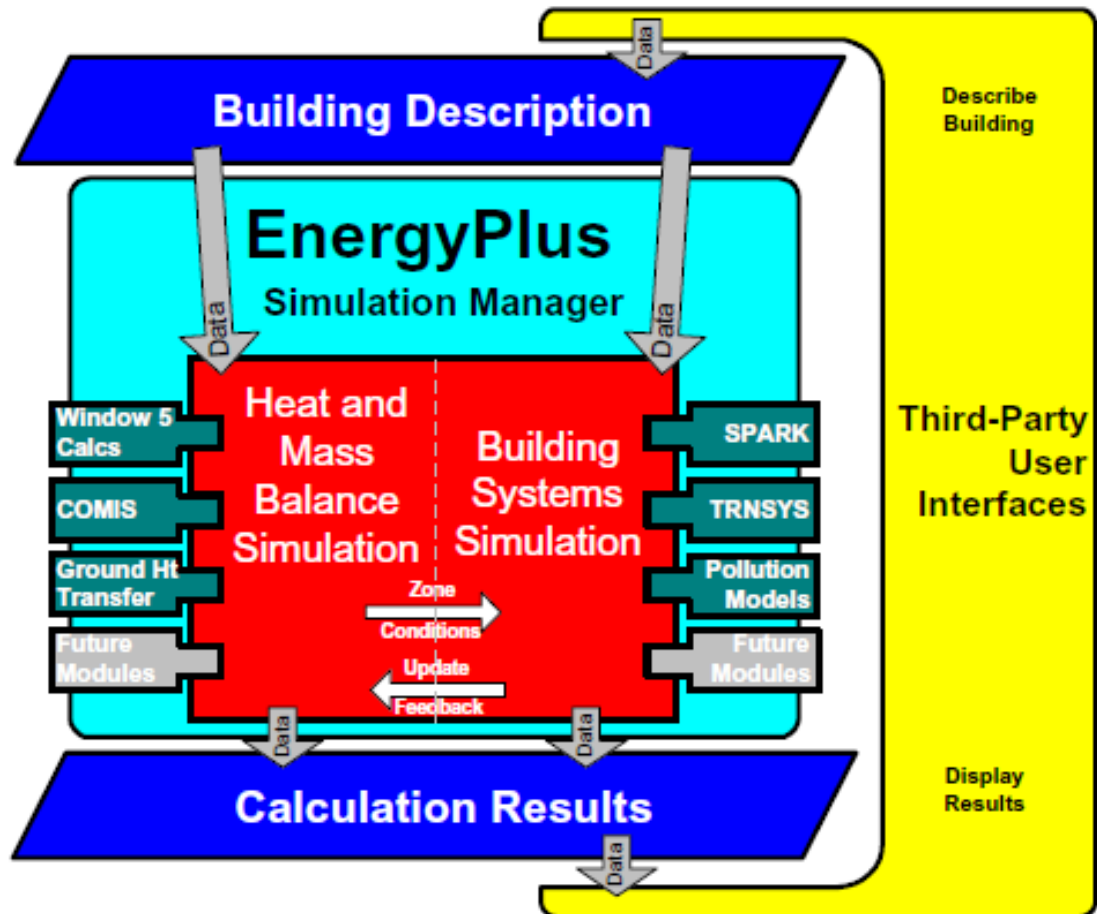


Рисунок 2.1.1 – Загальна структура програми EnergyPlus [14]

Менеджер моделювання контролює взаємодію між усіма петлями моделювання на погодинному рівні. Функції окремих модулів моделювання спрямовані менеджером моделювання для виконання таких дій, як ініціалізація, імітація, запис даних, або формування звітів. Менеджер моделювання забезпечує кілька важливих переваг:

- основні цикли моделювання знаходяться в одному модулі;
- інші модулі є автономними і більш об'єктно-орієнтованими;
- контролюється доступ до даних;
- нові модулі можуть бути легко додані.

Менеджер моделювання EnergyPlus керує модулями теплового балансу між поверхнями та середовищем і виступає як сполучна ланка для моделювання теплового балансу будівлі і інженерних енергетичних систем. Структура інтегрованого менеджера моделювання наведена на рисунку 2.1.2.

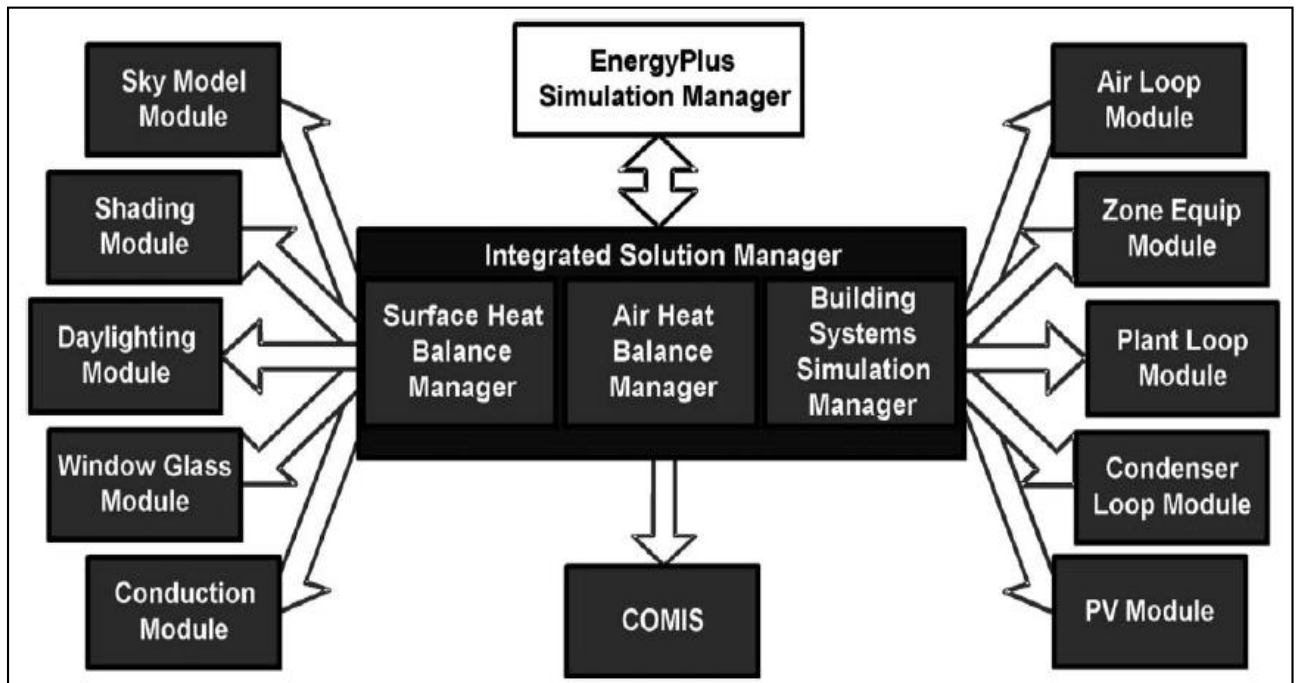


Рисунок 2.1.2 – Інтегрований менеджер моделювання [14]

Модуль теплового балансу імітує тепловий баланс між поверхнями всередині і зовні; взаємозв'язок між тепловими балансами і граничними умовами; процеси теплопровідності, конвекції, випромінювання і масообміну. Модуль масового балансу повітря пов'язаний з різними масовими потоками, такими як вентиляція повітря та інфільтрація.

За допомогою модуля теплового і масового балансу ми можемо підключитися до COMIS (1999) для поліпшення якості розрахунків повітряних потоків між зонами, інфільтрації, а також розрахунків вентиляції. На додаток до основного модуля теплового і масового балансу від IBLAST, створено три інші модулі на основі можливостей DOE-2: денне освітлення Daylighting (Winkelmann and Selkowitz 1985), WINDOW 5 (Arestah et al. 1994) та анізотропне небо. Модуль Daylighting обчислює внутрішню освітленість від сонця, відблиски від вікон та

управляє електричним освітленням, зокрема, обчислює зниження енергоспоживання електричним освітленням. Модуль WINDOW 5 включає в себе можливості розрахунку кутової залежності пропускання і поглинання як для сонячного так і для видимого випромінювання. Користувачі можуть вводити шар за шаром конструкцію вікна або вибрати типові конструкції вікон із шаблонів (звичайні вікна, світловідбиваючі, низькоемісійні, з різними газовими наповнювачами, електрохромні). EnergyPlus дозволяє задавати віконні конструкції різних конфігурацій в залежності від кліматичних умов і типів будівель. Програма може оцінити вплив віконних конструкцій не лише на теплове навантаження, а й на природну вентиляцію, освітлення та тепловий комфорт. У статті [15] аналізуються особливості моделювання вікон в EnergyPlus. Зокрема, в даній статті йде мова про такі можливості, які враховуються програмою:

- пошарове введення скління;
- оптичні властивості скла;
- кути падіння та відбиття випромінювання;
- ітераційне рішення теплового балансу для визначення температури поверхні скла;
- розрахунок теплопередачі крізь раму та імпорт;
- моделювання рухомих затінюючих пристроїв.

Після того, як модуль теплового балансу завершує моделювання для певного періоду часу, викликається модуль симуляції систем будівлі, який контролює моделювання ОВК та електричних систем, обладнання та компонентів енергетичних систем (рисунок 2.1.3).

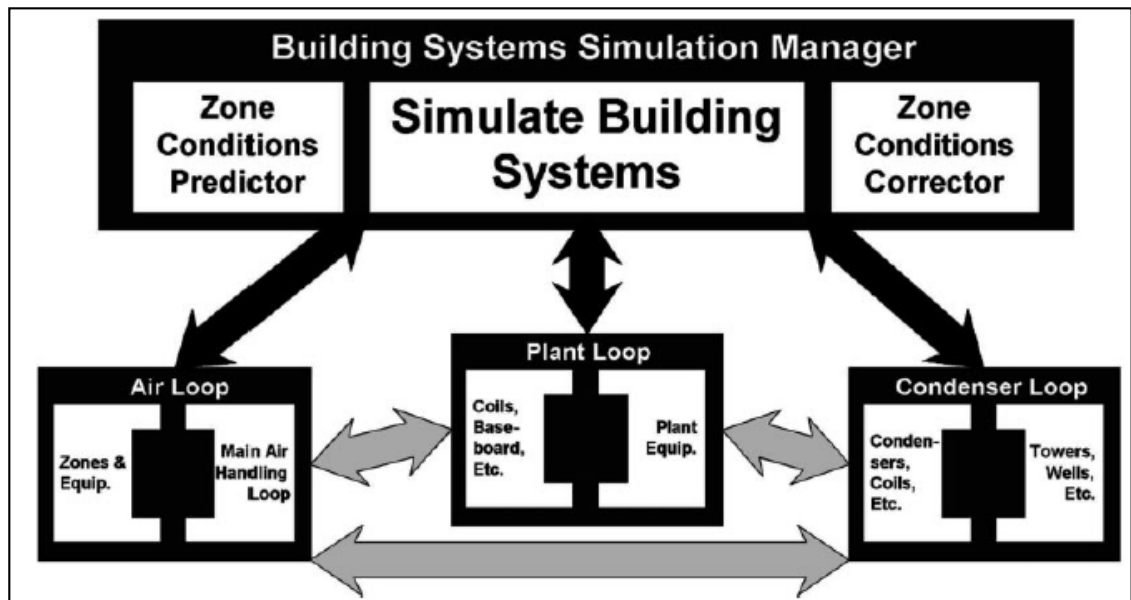


Рисунок 2.1.3 – Модуль симуляції систем будівлі [14]

Модуль симуляції систем будівлі керує зв'язком між модулем теплового балансу і різними ОВК модулями і елементами системи, такими як котли, холодильні машини, насоси, вентилятори та інше обладнання, а також керує обміном даними між даними модулями у вигляді вхідних і вихідних даних. Даний менеджер також контролює взаємодію та обмін даними між EnergyPlus і SPARK (1993), а також між EnergyPlus і TRNSYS (Solar Energy Laboratory 2000).

Згідно з рисунком 1.3 моделювання інженерних систем будівлі в EnergyPlus може включати:

- моделювання систем повітропостачання (Air Loop);
- моделювання систем опалення (Plant Loop);
- моделювання інженерних систем, в яких відбувається фазовий перехід (Condenser Loop).

Моделювання інженерних систем у даній програмі є детальним, включає в себе введення усіх гілок, вузлів та елементів систем.

Обидві компанії BLAST і DOE-2 успішно залучили багато сторонніх розробників для створення користувацьких інтерфейсів і нових модулів для EnergyPlus (Third-Party User Interfaces). Можливості підключення різноманітних інтерфейсів і розширюваність були передбачені для полегшення та підвищення

точності процесу моделювання.

Таким чином, EnergyPlus не тільки поєднує в собі кращі риси BLAST і DOE-2, але і являє собою значний крок вперед з точки зору обчислювальної техніки і програмних структур.

Математичне моделювання енергоспоживання з EnergyPlus дозволяє фахівцям проаналізувати енергетичні характеристики будівель та знайти шляхи оптимізації енергосистем та конструкцій з метою підвищення їх енергетичної ефективності. EnergyPlus заснований на комплексному (розрахунок навантаження та моделювання) підході, результатом чого є більш точні прогнози температур, що дозволяє точніше оцінити різні параметри, такі як температурний комфорт. Розрахунки теплового навантаження в програмі побудовані на методиці ASHRAE.

Програма EnergyPlus здатна моделювати реальні умови роботи традиційних систем опалення, охолодження, вентиляції, водопостачання та освітлення в будівлях, а також теплових насосів, сонячних систем тепло- та електропостачання тощо. Інтегроване моделювання в EnergyPlus дає користувачам можливість оцінити цілий ряд процесів, що ні в BLAST, ні DOE-2 не аналізуються на необхідному рівні. Програма включає в себе такі можливості як моделювання енергоспоживання по зонам (враховуючи потоки повітря між зонами), розрахунок радіаційного теплообміну, поглинання вологи, десорбції, тощо. Крім того, даний програмний засіб дозволяє вручну змінювати більшість параметрів.

EnergyPlus використовує більш реалістичні умови управління різними системами ОВК ніж її попередники, що дозволяє отримувати точніші та надійніші результати моделювання. Програма має вбудовані шаблони типових систем вентиляції, охолодження, опалення та ін., котрі являються відправною точкою для користувачів. На основі шаблонів розробляються інші необхідні конфігурації цих систем.

Моделювання в EnergyPlus забезпечує гнучкість і функціональність енергетичного аналізу протягом всіх етапів життєвого циклу будівлі з деякими

обмеженнями. Програма передбачає, що системи ОВК функціонують в ідеальних умовах, при цьому не враховуючи повільного спаду продуктивності компонентів енергетичних систем внаслідок забруднень, корозії та інших впливів, які зменшують продуктивність кліматичного обладнання.

Особливістю програми є те, що вона проводить як погодинні симуляції на всіх рівнях так і по обраному користувачем періоду симуляції («проектний» день (design day), доба, місяць, рік або кілька років). Також EnergyPlus має базу даних з погодними умовами для багатьох міст в різних країнах світу, в тому числі і для України (м. Київ та м. Одеса).

Етапи виконання енергетичного моделювання будівлі в EnergyPlus:

1. Створення будівлі. EnergyPlus не має свого графічного інтерфейсу – введення і виведення інформації здійснюється через текстові файли. Але існує можливість створення геометрії шляхом завантаження файлів з інших програм, таких як AutoCAD або Google Sketch Up. Останнім часом все частіше використовується SketchUp, для якої написана велика кількість модулів для побудови моделі енергоспоживання, наприклад Open Studio Plug-in. Окрім геометрії будівлі необхідно також вказати типи використовуваних конструктивних матеріалів та параметри, що характеризують їх властивості у спеціальних вікнах.

2. Моделювання. На даному етапі вирішується, які змінні розглядатимуться при моделюванні та запускається симуляція. Теплові характеристики будівлі можуть змінюватися в залежності від її призначення (офіс, житлова будівля тощо), тому що від діяльності людей залежить час використання існуючого обладнання (систем освітлення, опалення, кондиціонування тощо). Час використання протягом доби або навіть року вказується шляхом складання графіків роботи. Опис усіх цих параметрів дозволяє визначити навантаження на систему опалення та охолодження.

3. Аналіз результатів. Після запуску симуляції програма перевіряє модель на наявність помилок та невідповідностей в введених параметрах. У деяких випадках програма видає попередження щодо чинників, які можуть призводити

до неправильного розрахунку. В якості результатів моделювання може виводитися велика кількість звітів, наприклад, погодинні, щоденні, щомісячні та щорічні значення енергоспоживання на опалення, охолодження, освітлення та водопостачання по зонах; дані щодо погодних умов (зовнішня температура, температура сухого та вологого термометру, швидкість та напрямок вітру тощо); конвективі, радіаційні та видимі теплонадходження від обладнання та людей тощо [15].

2.2 Створення графічної моделі в Google SketchUp

При побудові даної моделі особливу увагу приділяємо розміру вікна (2,5м×1,5м) відносно розміру самої будівлі (4м×3,5м×3,5м). Сама модель є не складною, адже нас цікавить не особливість її конструкції, а відсоткове співвідношення отриманих результатів.

В наступному етапі ми по чергово задаємо інформацію щодо географічної орієнтації приміщення та виду будівельних конструкцій. Наприклад: вікно в нас знаходиться на зовнішній стіні, орієнтація на південь, а також присутній вплив сонячних променів та вітрового потоку (рисунок 2.2.1).

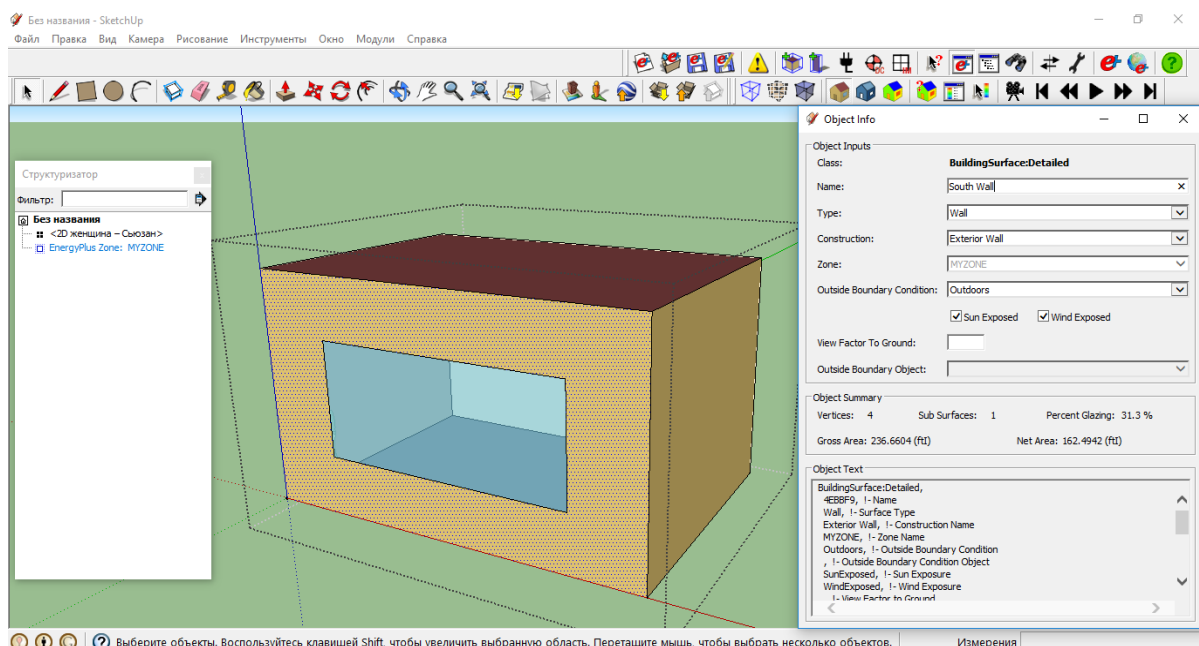


Рисунок 2.2.1 – Графічна модель

2.3 Ведення вихідних даних

За допомогою утиліти IDF-Editor задаємо необхідними вихідними даними, такими як: розташування об'єкта, погодні умови, години роботи, джерела теплонадходжень, матеріали конструкцій і т.д. (рисунк 2.3.1)

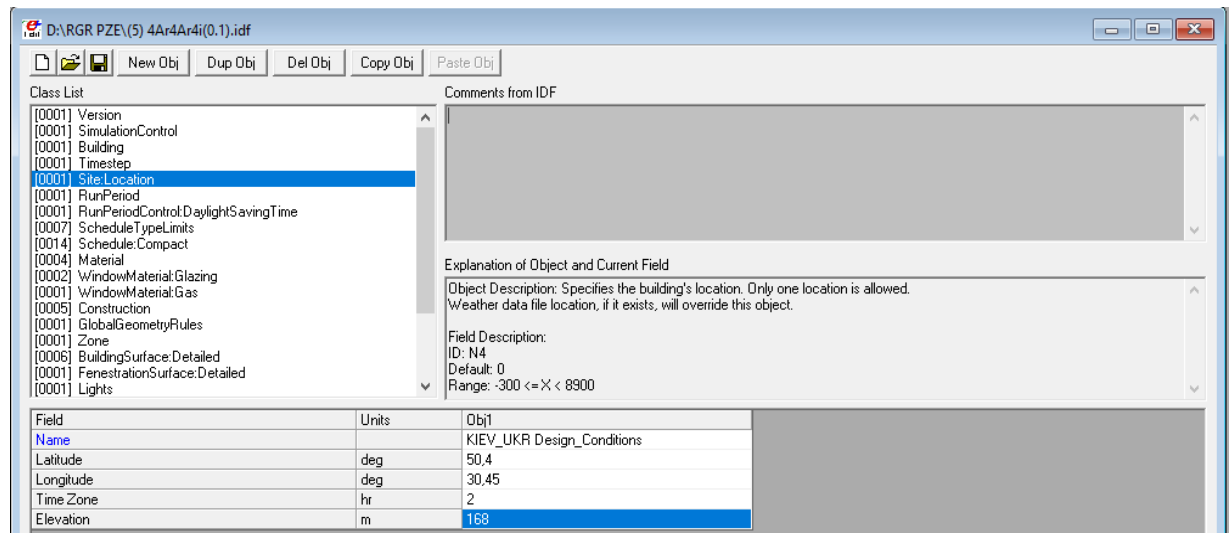


Рисунок 2.3.1 – Задаємо погодні умови відповідно для м. Києва

Планується провести 63 розрахунки з різними типами склопакетів, для цього обираємо матеріали стін підлоги та скління (рисунк 2.3.2)

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		Clear 4mm	LoE CLEAR 4MM Rev	LoE SPEC SEL CLEAR 4MM Rev
Optical Data Type		SpectralAverage	SpectralAverage	SpectralAverage
Window Glass Spectral Data Set Name				
Thickness	m	0,004	0,004	0,004
Solar Transmittance at Normal Incidence		0,837	0,63	0,43
Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,075	0,22	0,42
Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,075	0,19	0,3
Visible Transmittance at Normal Incidence		0,898	0,85	0,77
Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,081	0,079	0,06
Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,081	0,056	0,07
Infrared Transmittance at Normal Incidence		0	0	0
Front Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84	0,1	0,03
Back Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84	0,84	0,84
Conductivity	W/m-K	0,9	0,9	0,9
Dirt Correction Factor for Solar and Visible Transmittance				
Solar Diffusing				
Young's modulus	Pa			
Poisson's ratio				

Рисунок 2.3.2 – Обрання матеріалів конструкції

У вікні *WindowMaterial:Glazing*, задається п'ять типів скла, які є в склопакеті а саме: скло звичайне (*Clear 4mm*) з коефіцієнтом емісії 0,84, *k*-скло (*LoE CLEAR 4mm* та реверс *LoE CLEAR 4mm Rev*) з коефіцієнтом емісії 0,1 та *i*-скло (*LoE SPEC SEL CLEAR* та реверс *LoE SPEC SEL CLEAR 4mm Rev*) 0,3 відповідно.

Також важливо знати, що програма EnergyPlus враховує поверхні, які відбивають сонячне випромінювання (*Reveal surfaces*) пов'язані з розташуванням скління з зовнішньої сторони і/або внутрішньої сторони стіни (рисунки 2.3.3).

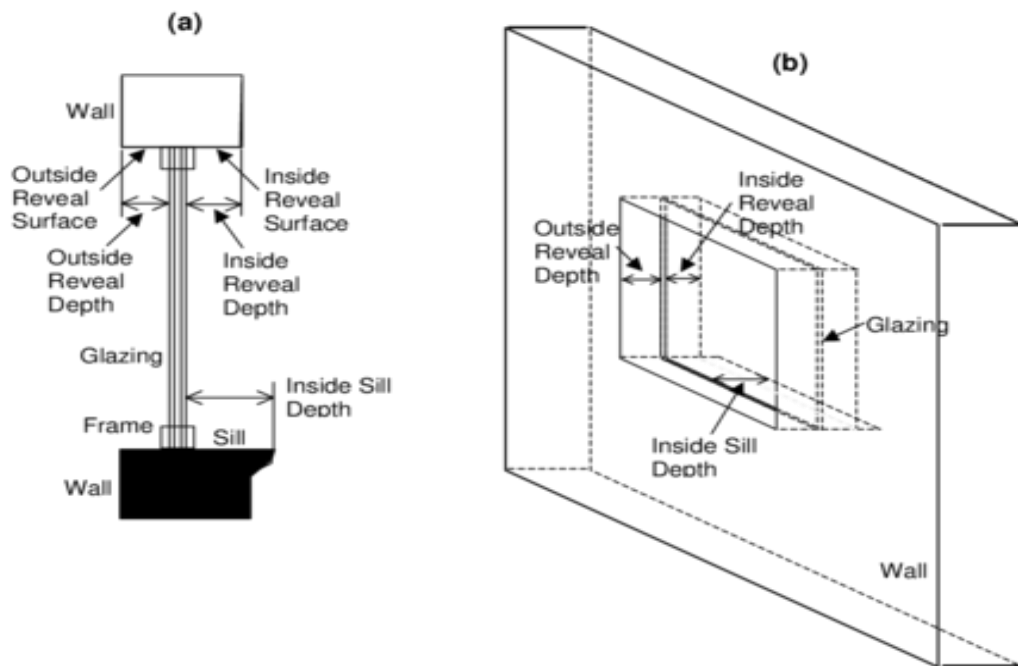


Рисунок 2.3.3 – Поверхні, що відбивають сонячне випромінювання (*Reveal surfaces*) [4]

У вікні *WindowMaterial:Gas* задається газ, який закачується в камеру склопакету. У даному випадку контури між склом заповнені трьома різними газами: висушене повітря, Аргон та Ксенон. Далі для проведення експерименту створюємо 63 різних файли починаючи від СПО заповненого повітрям зі звичайним склом та закінчуючи СПТ заповненого Ксеноном з використанням двох *i*-стекол.

2.4 Проведення моделювання в середовищі EnergyPlus

Відкриваємо наші файли за допомогою утиліти EP-Launch, що має наступний вигляд (рисунок 2.4.1).

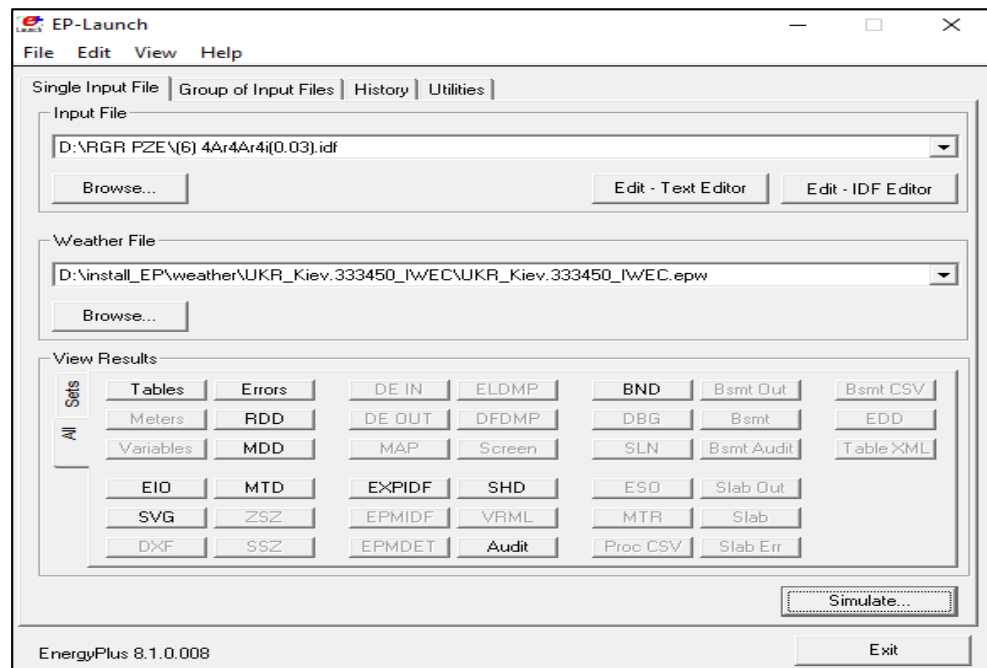


Рисунок 2.4.1 – Інтерфейс утиліти EP-Launch

Далі проводимо симуляцію, після того як ми впевнились, що відсутні будь які помилки – виводимо результати в вигляді таблиць (рисунок 2.4.2).

Program Version: EnergyPlus-Windows-64 8.1.0.008 , YMD=2017.12.26 22:30			
Tabular Output Report in Format: HTML			
Building: Untitled			
Environment: KIEV - UKR IWEC Data WMO#=333450			
Simulation Timestamp: 2017-12-26 22:30:05			
Report: Annual Building Utility Performance Summary			
For: Entire Facility			
Timestamp: 2017-12-26 22:30:05			
Values gathered over 8760.00 hours			
Site and Source Energy			
	Total Energy [GJ]	Energy Per Total Building Area [MJ/m2]	Energy Per Conditioned Building Area [MJ/m2]
Total Site Energy	12.46	711.99	711.99
Net Site Energy	12.46	711.99	711.99
Total Source Energy	37.25	2128.58	2128.58
Net Source Energy	37.25	2128.58	2128.58

Рисунок 2.4.2 – Приклад звітних таблиць

Серед представлених даних обираємо ті, що нас найбільше цікавлять, а саме:

- District Cooling – кількість енергії затраченої на кондиціонування (охолодження) приміщення протягом заданого періоду.

- District Heating – кількість енергії затраченої на опалення (обігрів) приміщення протягом заданого періоду.

- Glass U-Factor – втрати тепла через скло внаслідок різниці температур внутрішнього та зовнішнього повітря, чим нижче U-коефіцієнт, тим кращі його теплоізоляційні властивості.

- Glass SHGC – коефіцієнт посилення сонячної енергії, тобто відсоток сонячної енергії, що передається через скло до приміщення [16].

Провівши 63 таких симуляцій, всі отримані дані заносимо до загальної таблиці (таблиця 2.4.1) для надання результатів та проведення подальших розрахунків.

Таблиця 2.4.1 – Результати моделювання в програмі EnergyPlus

Заповнення камер	№	Види склопакетів	Отримані результати			
			District Cooling [ГДж]	District Heating [ГДж]	Glass U-Factor [Вт/м² · К]	Glass SHGC
1	2	3	4	5	6	7
Висушене повітря	1	4-Air-4	3,25	8,68	4,49	0,76
	2	4-Air-4kf	2,48	9,21	4,36	0,62
	3	4kb-Air-4	2,42	9,27	4,36	0,60
	4	4kb-Air-4kf	1,96	9,73	4,35	0,51
	5	4-Air-4if	1,83	9,86	4,34	0,48
	6	4ib-Air-4	1,66	10,04	4,34	0,45
	7	4ib-Air-4if	1,18	10,70	4,34	0,33
	8	4-Air-4-Air-4	2,83	8,46	3,65	0,67
	9	4-Air-4-Air-4kf	2,30	8,87	3,56	0,57
	10	4kb-Air-4-Air-4	2,16	9,00	3,57	0,54
	11	4kb-Air-4-Air-4kf	1,84	9,28	3,48	0,47
	12	4-Air-4-Air-4if	1,83	9,36	3,55	0,46
	13	4ib-Air-4-Air-4	1,52	9,69	3,56	0,41
	14	4ib-Air-4-Air-4if	1,21	10,13	3,46	0,31

Продовження таблиці 2.4.3

1	2	3	4	5	6	7
Висушене повітря	15	4-Air-4-Air-4-Air-4	2,52	8,32	3,08	0,61
	16	4-Air-4-Air-4-Air-4kf	2,14	8,63	3,02	0,52
	17	4kb-Air-4-Air-4-Air-4	1,95	8,81	3,02	0,49
	18	4kb-Air-4-Air-4-Air-4kf	1,72	9,03	2,96	0,43
	19	4-Air-4-Air-4-Air-4if	1,80	9,00	3,01	0,44
	20	4ib-Air-4-Air-4-Air-4	1,40	9,44	3,01	0,37
	21	4ib-Air-4-Air-4-Air-4if	1,13	9,79	2,94	0,29
Аргон	22	4-Ar-4	3,86	7,09	2,54	0,76
	23	4-Ar-4kf	3,70	6,32	1,50	0,65
	24	4kb-Ar-4	3,16	6,61	1,50	0,60
	25	4kb-Ar-4kf	2,72	6,81	1,40	0,52
	26	4-Ar-4if	2,96	6,63	1,34	0,53
	27	4ib-Ar-4	2,19	7,13	1,34	0,44
	28	4ib-Ar-4if	1,65	7,61	1,31	0,33
	29	4-Ar-4-Ar-4	3,54	6,57	1,62	0,69
	30	4-Ar-4-Ar-4kf	3,18	6,29	1,06	0,58
	31	4kb-Ar-4-Ar-4	2,87	6,50	1,11	0,55
	32	4kb-Ar-4-Ar-4kf	2,54	6,46	0,78	0,47
	33	4-Ar-4-Ar-4if	2,60	6,58	0,96	0,48
	34	4ib-Ar-4-Ar-4	2,03	7,03	1,01	0,41
	35	4ib-Ar-4-Ar-4if	1,63	7,12	0,67	0,31
	36	4-Ar-4-Ar-4-Ar-4	3,19	6,40	1,19	0,62
	37	4-Ar-4-Ar-4-Ar-4kf	2,78	6,33	0,84	0,52
	38	4kb-Ar-4-Ar-4-Ar-4	2,61	6,48	0,88	0,51
	39	4kb-Ar-4-Ar-4-Ar-4kf	2,29	6,51	0,66	0,44
	40	4-Ar-4-Ar-4-Ar-4if	2,33	6,59	0,77	0,44
	41	4ib-Ar-4-Ar-4-Ar-4	1,89	6,99	0,82	0,38
	42	4ib-Ar-4-Ar-4-Ar-4if	1,52	7,13	0,58	0,29
Ксенон	43	4-Xe-4	3,95	6,95	2,45	0,77
	44	4-Xe-4kf	3,92	6,07	1,32	0,66
	45	4kb-Xe-4	3,31	6,35	1,32	0,60
	46	4kb-Xe-4kf	2,89	6,52	1,20	0,52
	47	4-Xe-4if	3,20	6,33	1,14	0,54
	48	4ib-Xe-4	2,31	6,84	1,14	0,43

Продовження таблиці 3.3.1

1	2	3	4	5	6	7
Ксенон	49	4ib-Xe-4if	1,76	7,29	1,10	0,33
	50	4-Xe-4-Xe-4	3,62	6,41	1,53	0,69
	51	4-Xe-4-Xe-4kf	3,30	6,06	0,94	0,58
	52	4kb-Xe-4-Xe-4	3,01	6,26	0,98	0,55
	53	4kb-Xe-4-Xe-4kf	2,65	6,21	0,67	0,48
	54	4-Xe-4-Xe-4if	2,71	6,32	0,83	0,48
	55	4ib-Xe-4-Xe-4	2,16	6,76	0,87	0,41
	56	4ib-Xe-4-Xe-4if	1,72	6,84	0,55	0,31
	57	4-Xe-4-Xe-4-Xe-4	3,26	6,25	1,10	0,62
	58	4-Xe-4-Xe-4-Xe-4kf	2,84	6,14	0,74	0,52
	59	4rb-Xe-4-Xe-4-Xe-4	2,75	6,27	0,78	0,51
	60	4rb-Xe-4-Xe-4-Xe-4kf	2,38	6,31	0,55	0,44
	61	4-Xe-4-Xe-4-Xe-4if	2,37	6,39	0,66	0,43
	62	4ib-Xe-4-Xe-4-Xe-4	2,01	6,75	0,71	0,39
	63	4ib-Xe-4-Xe-4-Xe-4if	1,59	6,90	0,46	0,29

Індекс «f» (front) – означає, що покриття нанесене на скло зі сторони направленої в бік вулиці, а індекс «b» (back) – означає, що покриття нанесене з тієї сторони скла, яка направлена в сторону приміщення відповідно.

З отриманих даних бачимо, що найменші затрати на опалення 6,06 ГДж або 1,45 Гкал має модель №51 з склопакетом 4-Xe-4-Xe-4kf, а найменші витрати на кондиціонування 1,13 ГДж або 313,91 кВт·год має модель №42 зі склопакетом 4ib-Ar-4-Ar-4-Ar-4if.

Щоб більш детально розглянути та точно визначити оптимальну формулу скління для нашої будівлі отримані результати поділимо на групи відповідно від кількості камер.

Однокамерний склопакет.

На рисунку 2.4.3 представлено однокамерний склопакет в розрізі з вказаними видами стекол, що застосовувались під час моделювання їх направлення відповідно фасаду та наявний газовий прошарок між ними.

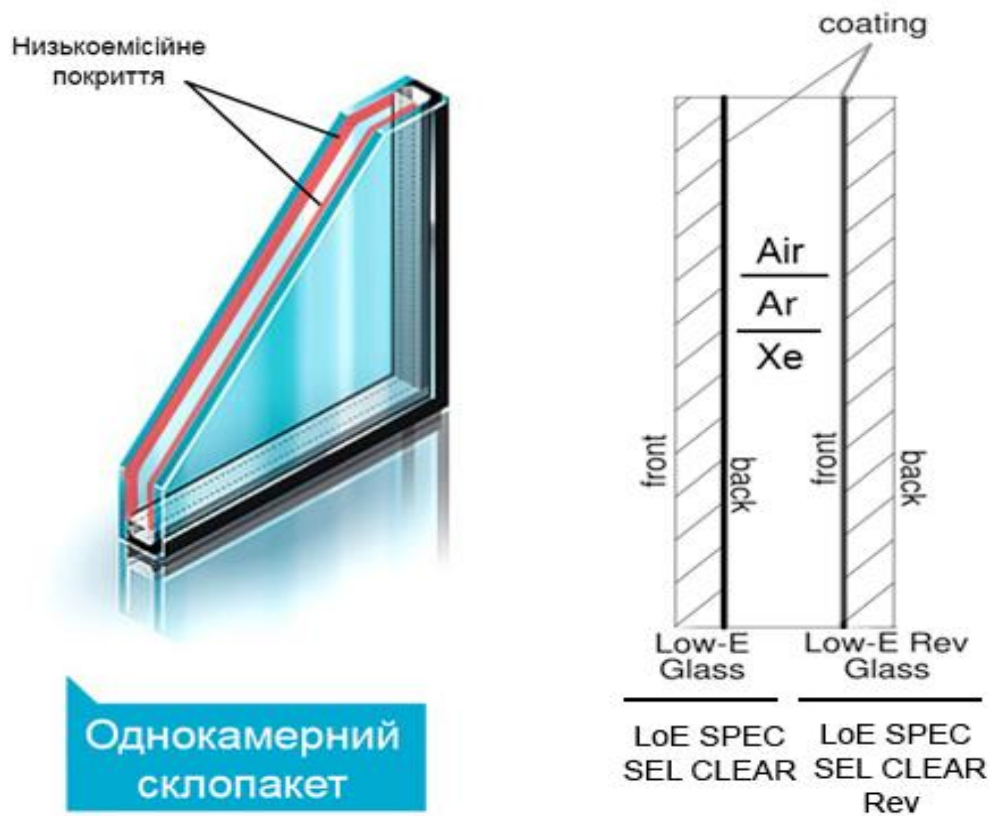


Рисунок 2.4.3 – Конструктивні характеристики СПО

Для подальших операцій визначаємо опір теплопередачі всіх СПО та перераховуємо енерговитрати у відповідних розмірностях (таблиця 2.4.2)

Таблиця 2.4.2 – Теплофізичні характеристики СПО

№	Склопакет	Опір теплопередачі, $((\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт})$	Витрати енергії на кондиціювання		Витрати енергії на обігрів	
			(ГДж)	(кВт·год)	(ГДж)	(Гкал)
1	2	3	4	5	6	7
1	4-Air-4	0,22	3,25	902,85	8,68	2,07
2	4-Air-4kf	0,23	2,48	688,94	9,21	2,20
3	4kb-Air-4	0,23	2,42	672,28	9,27	2,22
4	4kb-Air-4kf	0,23	1,96	544,49	9,73	2,33
5	4-Air-4if	0,23	1,83	508,37	9,86	2,36
6	4ib-Air-4	0,23	1,66	461,15	10,04	2,40
7	4ib-Air-4if	0,23	1,18	327,80	10,70	2,56
8	4-Ar-4	0,39	3,86	1072,31	7,09	1,69

Продовження таблиці 2.4.2

1	2	3	4	56	6	7
9	4-Ar-4kf	0,67	3,70	1027,86	6,32	1,51
10	4kb-Ar-4	0,67	3,16	877,85	6,61	1,58
11	4kb-Ar-4kf	0,72	2,72	755,62	6,81	1,63
12	4-Ar-4if	0,74	2,96	822,29	6,63	1,58
13	4ib-Ar-4	0,74	2,19	608,38	7,13	1,70
14	4ib-Ar-4if	0,76	1,65	458,37	7,61	1,82
15	4-Xe-4	0,41	3,95	1097,31	6,95	1,66
16	4-Xe-4kf	0,76	3,92	1088,98	6,07	1,45
17	4kb-Xe-4	0,76	3,31	919,52	6,35	1,52
18	4kb-Xe-4kf	0,83	2,89	802,84	6,52	1,56
19	4-Xe-4if	0,88	3,20	888,96	6,33	1,51
20	4ib-Xe-4	0,88	2,31	641,72	6,84	1,63
21	4ib-Xe-4if	0,91	1,76	488,93	7,29	1,74

Далі будуюмо графік залежності зміни витрат енергії на опалення та кондиціонування приміщення від наявного покриття та газового прошарку однокамерного склопакета (рисунок – 2.4.4).

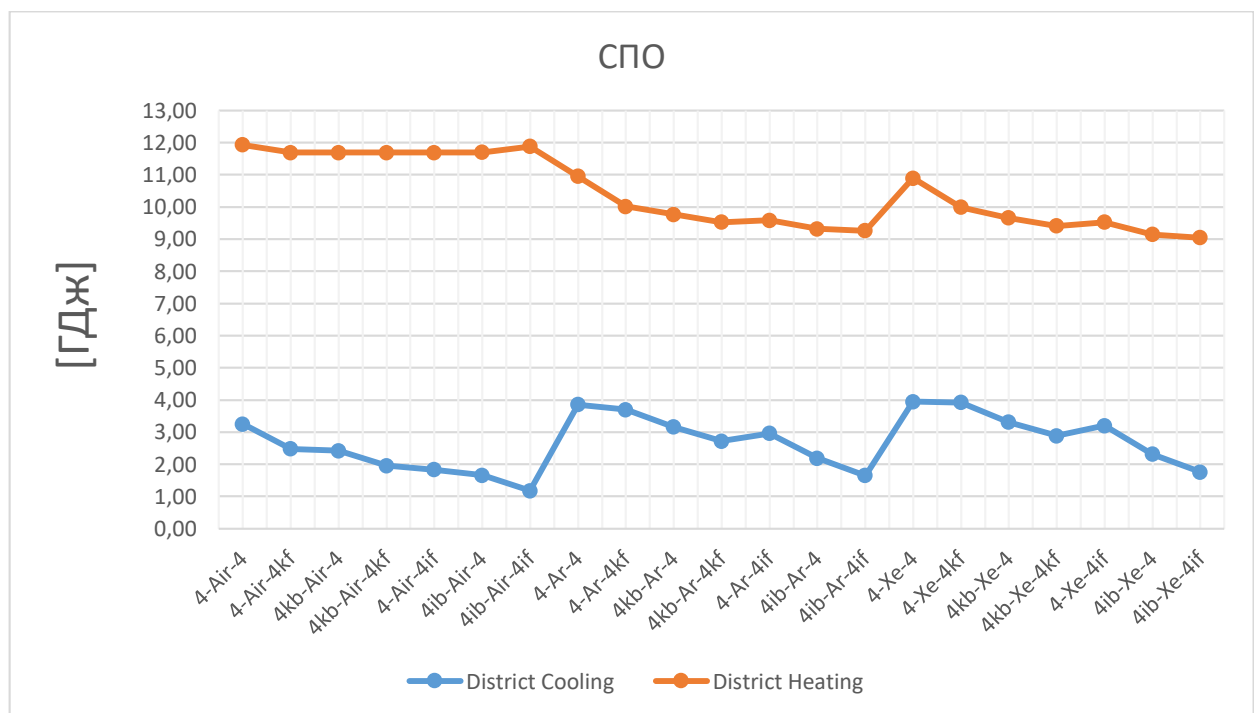


Рисунок 2.4.4 – Графік залежності енерговитрат від формули СПО

Для наочності зобразимо графік чисельних значень опору теплопередачі кожного СПО (рисунок 2.4.5) з межею (позначено червоною лінією) відповідно нормативному значенню $R=0,75$ ($(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}) / \text{Вт}$) [2] для першої температурної зони.

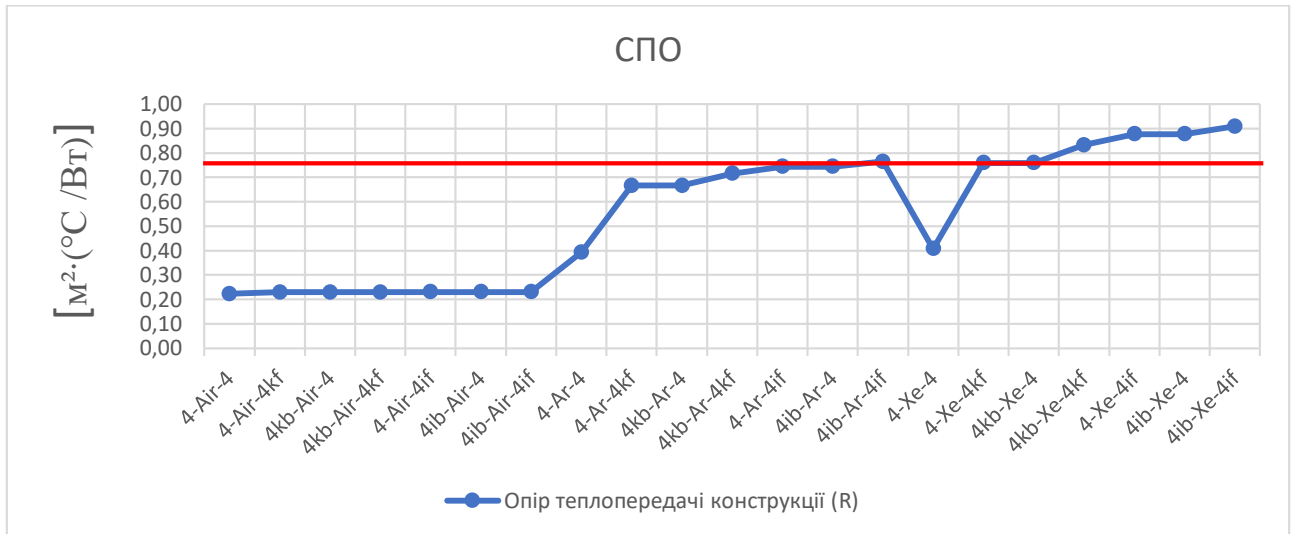


Рисунок 2.4.5 – Порівняння опору теплопередачі однокамерних склопакетів з нормативними показниками

Двокамерний склопакет.

На рисунку 2.4.6 представлено однокамерний склопакет в розрізі з вказаними видами стекол, що застосовувались під час моделювання їх направлення відповідно фасаду та наявний газовий прошарок між ними.

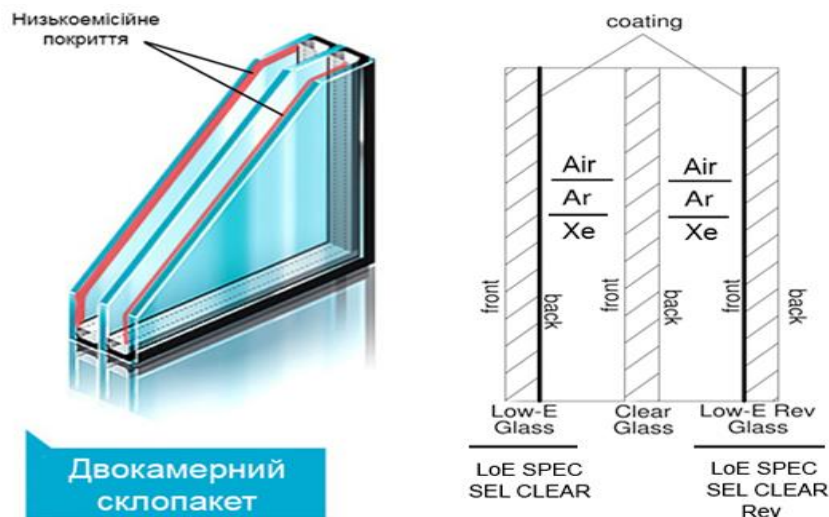


Рисунок 2.4.6 – Конструктивні характеристики СПД

Визначаємо опір теплопередачі всіх СПД та перераховуємо енерговитрати у відповідних розмірностях (таблиця 2.4.3).

Таблиця 2.4.3 – Теплофізичні характеристики СПД

№	Склопакет	Опір теплопередачі, $((\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт})$	Витрати енергії на кондиціювання		Витрати енергії на обігрів	
			(ГДж)	(кВт·год)	(ГДж)	(Гкал)
1	4-Air-4-Air-4	0,27	2,83	786,17	8,46	2,02
2	4-Air-4-Air-4kf	0,28	2,30	638,94	8,87	2,12
3	4kb-Air-4-Air-4	0,28	2,16	600,05	9,00	2,15
4	4kb-Air-4-Air-4kf	0,29	1,84	511,15	9,28	2,22
5	4-Air-4-Air-4if	0,28	1,83	508,37	9,36	2,24
6	4ib-Air-4-Air-4	0,28	1,52	422,26	9,69	2,32
7	4ib-Air-4-Air-4if	0,29	1,21	336,14	10,13	2,42
8	4-Ar-4-Ar-4	0,62	3,54	983,41	6,57	1,57
9	4-Ar-4-Ar-4kf	0,95	3,18	883,40	6,29	1,50
10	4kb-Ar-4-Ar-4	0,90	2,87	797,29	6,50	1,55
11	4kb-Ar-4-Ar-4kf	1,28	2,54	705,61	6,46	1,54
12	4-Ar-4-Ar-4if	1,04	2,60	722,28	6,58	1,57
13	4ib-Ar-4-Ar-4	0,99	2,03	563,93	7,03	1,68
14	4ib-Ar-4-Ar-4if	1,50	1,63	452,81	7,12	1,70
15	4-Xe-4-Xe-4	0,65	3,62	1005,64	6,41	1,53
16	4-Xe-4-Xe-4kf	1,06	3,30	916,74	6,06	1,45
17	4kb-Xe-4-Xe-4	1,02	3,01	836,18	6,26	1,50
18	4kb-Xe-4-Xe-4kf	1,50	2,65	736,17	6,21	1,48
19	4-Xe-4-Xe-4if	1,21	2,71	752,84	6,32	1,51
20	4ib-Xe-4-Xe-4	1,15	2,16	600,05	6,76	1,62
21	4ib-Xe-4-Xe-4if	1,83	1,72	477,82	6,84	1,63

Будуємо графік залежності зміни витрат енергії на опалення та кондиціювання приміщення від наявного покриття та газового прошарку двокамерного склопакета (рисунок – 2.4.7).

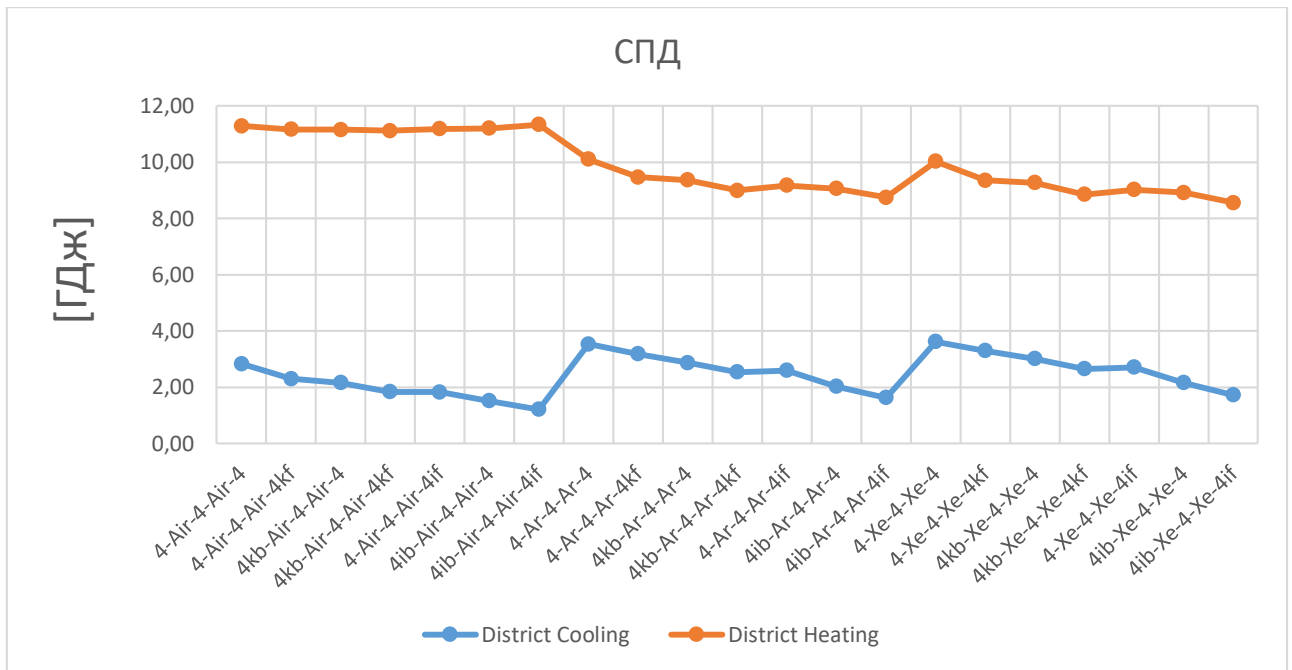


Рисунок 2.4.7 – Графік залежності енерговитрат від формули СПД

Зобразимо графік чисельних значень опору теплопередачі кожного СПО (рисунок 2.4.8) з межею (позначено червоною лінією) відповідно нормативному значенню.



Рисунок 2.4.8 – Порівняння опору теплопередачі двокамерних склопакетів з нормативними показниками.

Трикамерний склопакет.

На рисунку 2.4.9 представлено однокамерний склопакет в розрізі з вказаними видами стекол, що застосовувались під час моделювання їх направлення відповідно фасаду та наявний газовий прошарок між ними.

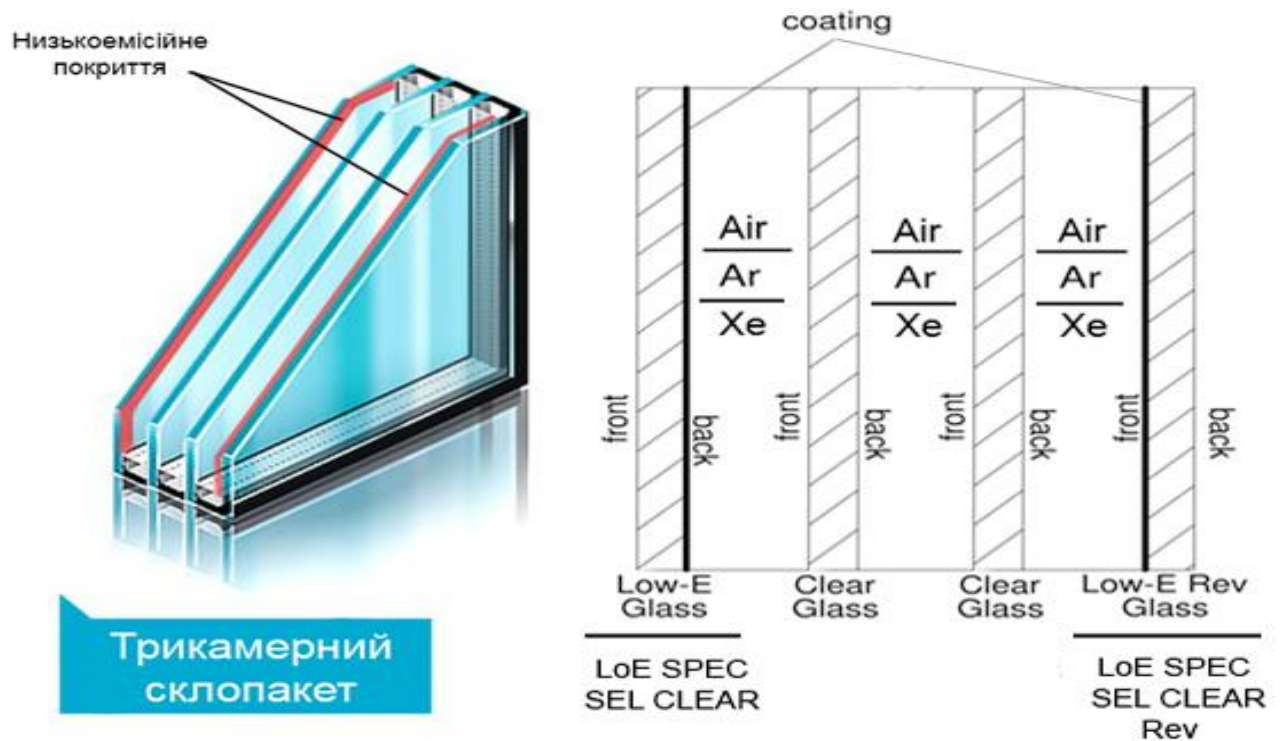


Рисунок 2.4.9 – Конструктивні характеристики СПТ

Визначаємо опір теплопередачі всіх СПТ та перераховуємо енерговитрати у відповідних розмірностях (таблиця 2.4.4).

Таблиця 2.4.4 – Теплофізичні характеристики СПТ

№	Склопакет	Опір теплопередачі, ((м²·°C)/Вт)	Витрати енергії на кондиціювання		Витрати енергії на обігрів	
			(ГДж)	(кВт·год)	(ГДж)	(Гкал)
1	2	3	4	5	6	7
1	4-Air-4-Air-4-Air-4	0,32	2,52	700,06	8,32	1,99
2	4-Air-4-Air-4-Air-4kf	0,33	2,14	594,49	8,63	2,06
3	4kb-Air-4-Air-4-Air-4	0,33	1,95	541,71	8,81	2,11

Продовження таблиці 2.3.4

1	2	3	4	5	6	7
4	4kb-Air-4-Air-4-Air-4kf	0,34	1,72	477,82	9,03	2,16
5	4-Air-4-Air-4-Air-4if	0,33	1,80	500,04	9,00	2,15
6	4ib-Air-4-Air-4-Air-4	0,33	1,40	388,92	9,44	2,26
7	4ib-Air-4-Air-4-Air-4if	0,34	1,13	313,91	9,79	2,34
8	4-Ar-4-Ar-4-Ar-4	0,84	3,19	886,18	6,40	1,53
9	4-Ar-4-Ar-4-Ar-4kf	1,19	2,78	772,28	6,33	1,51
10	4kb-Ar-4-Ar-4-Ar-4	1,14	2,61	725,06	6,48	1,55
11	4kb-Ar-4-Ar-4-Ar-4kf	1,51	2,29	636,16	6,51	1,56
12	4-Ar-4-Ar-4-Ar-4if	1,30	2,33	647,27	6,59	1,58
13	4ib-Ar-4-Ar-4-Ar-4	1,22	1,89	525,04	6,99	1,67
14	4ib-Ar-4-Ar-4-Ar-4if	1,74	1,52	422,26	7,13	1,70
15	4-Xe-4-Xe-4-Xe-4	0,91	3,26	905,63	6,25	1,49
16	4-Xe-4-Xe-4-Xe-4kf	1,36	2,84	788,95	6,14	1,47
17	4rb-Xe-4-Xe-4-Xe-4	1,29	2,75	763,95	6,27	1,50
18	4rb-Xe-4-Xe-4-Xe-4kf	1,81	2,38	661,16	6,31	1,51
19	4-Xe-4-Xe-4-Xe-4if	1,52	2,37	658,39	6,39	1,53
20	4ib-Xe-4-Xe-4-Xe-4	1,42	2,01	558,38	6,75	1,61
21	4ib-Xe-4-Xe-4-Xe-4if	2,16	1,59	441,70	6,90	1,65

Будуємо графік залежності зміни витрат енергії на опалення (рисунок – 2.4.10).

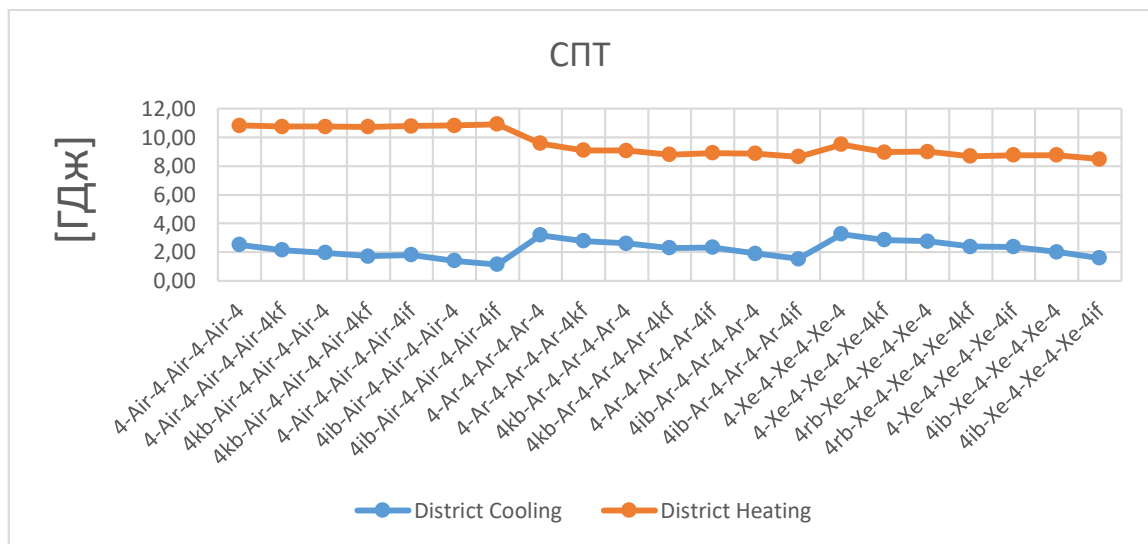


Рисунок 2.4.10 – Графік залежності енерговитрат від формули СПТ

Зобразимо графік чисельних значень опору теплопередачі кожного СПО (рисунок 2.4.11) з межею (червона лінія) відповідно нормативному значенню.

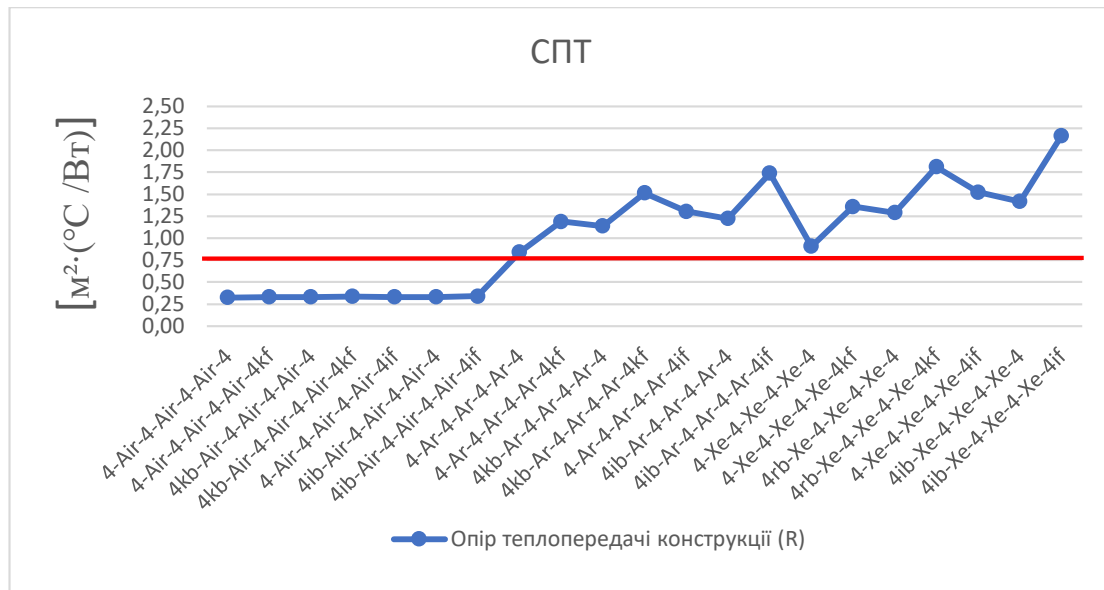


Рисунок 2.4.11 – Порівняння опору теплопередачі двокамерних склопакетів з нормативними показниками

Дані по енерговитратах на опалення зведемо до зручного формату (таблиця 2.4.5), що дасть змогу графічно оцінити (рисунок 2.4.12) характеристики склопакету відносно комбінацій застосованого покриття та газового заповнення.

Таблиця 2.4.5 – Витрати енергії на опалення кожного виду СП

Заповнен ня камер	Наявне покриття	СПО. Витрати енергії на опалення, (ГДж)	СПД. Витрати енергії на опалення, (ГДж)	СПТ. Витрати енергії на опалення, (ГДж)
1	2	3	4	5
Air	Без покриття	8,68	8,46	8,32
	kf	9,21	8,87	8,63
	kb	9,27	9,00	8,81
	kf+kb	9,73	9,28	9,03
	if	9,86	9,36	9,00
	ib	10,04	9,69	9,44
	if+ib	10,70	10,13	9,79

Продовження таблиці 2.4.5

1	2	3	4	5
Ar	Без покриття	7,09	6,57	6,40
	kf	6,32	6,29	6,33
	kb	6,61	6,50	6,48
	kf+kb	6,81	6,46	6,51
	if	6,63	6,58	6,59
	ib	7,13	7,03	6,99
	if+ib	7,61	7,12	7,13
Xe	Без покриття	6,95	6,41	6,25
	kf	6,07	6,06	6,14
	kb	6,35	6,26	6,27
	kf+kb	6,52	6,21	6,31
	if	6,33	6,32	6,39
	ib	6,84	6,76	6,75
	if+ib	7,29	6,84	6,90

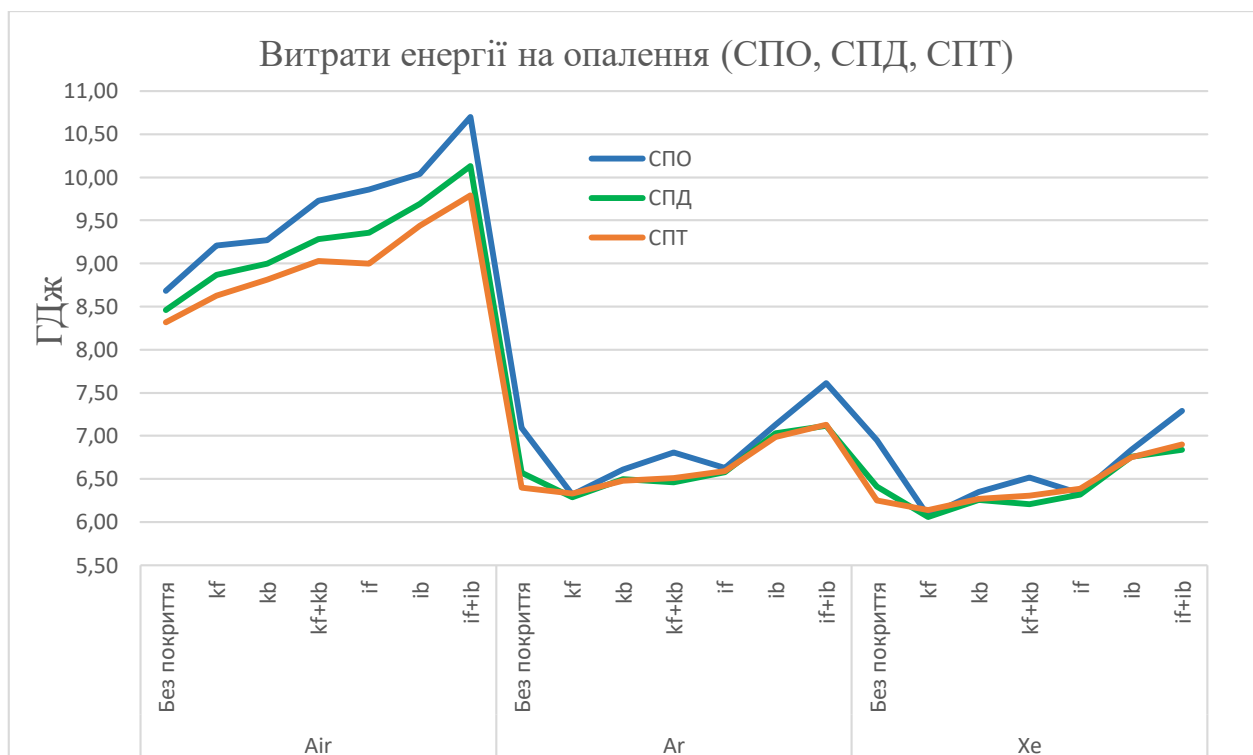


Рисунок 2.4.12 – Показники енерговитрат на опалення при застосуванні відповідного СП

З графіка (рисунок 2.4.12) видно, що застосування СП у яких прошарок між стеклами заповнений Аргоном або Ксеноном і застосоване одне низькоемісійне покриття з фронтальною орієнтацією не залежно від кількості камер мають приблизно однакові показники щодо витрат енергії на опалення приміщення. З цього можна зробити висновок, що застосування даного виду покриття зрівнює певні характеристики СП, що в подальшому може позитивно відобразитись на ціні віконної конструкції. Також можна побачити, що характеристики СПД і СПТ в даному порівнянні схожі між собою, на відмінну від показників СПО, які в більшості випадків є найнищими з представлених.

У відповідній формі покажемо значення витрат енергії на кондиціювання будівлі при застосуванні наявних СП (таблиця 2.4.6), та для наглядності представимо результати у відповідній формі на рисунку 2.4.13.

Таблиця 2.4.6 – Витрати енергії на кондиціювання кожного виду СП

Заповнення камер	Наявне покриття	СПО. Витрати енергії на конд., (ГДж)	СПД. Витрати енергії на конд., (ГДж)	СПТ. Витрати енергії на конд., (ГДж)
1	2	3	4	5
Air	Без покриття	3,25	2,83	2,52
	kf	2,48	2,30	2,14
	kb	2,42	2,16	1,95
	kf+kb	1,96	1,84	1,72
	if	1,83	1,83	1,80
	ib	1,66	1,52	1,40
	if+ib	1,18	1,21	1,13
Ar	Без покриття	3,86	3,54	3,19
	kf	3,70	3,18	2,78
	kb	3,16	2,87	2,61
	kf+kb	2,72	2,54	2,29
	if	2,96	2,60	2,33
	ib	2,19	2,03	1,89
	if+ib	1,65	1,63	1,52

Продовження таблиці 2.4.6

1	2	3	4	5
Xe	Без покриття	3,95	3,62	3,26
	kf	3,92	3,30	2,84
	kb	3,31	3,01	2,75
	kf+kb	2,89	2,65	2,38
	if	3,20	2,71	2,37
	ib	2,31	2,16	2,01
	if+ib	1,76	1,72	1,59

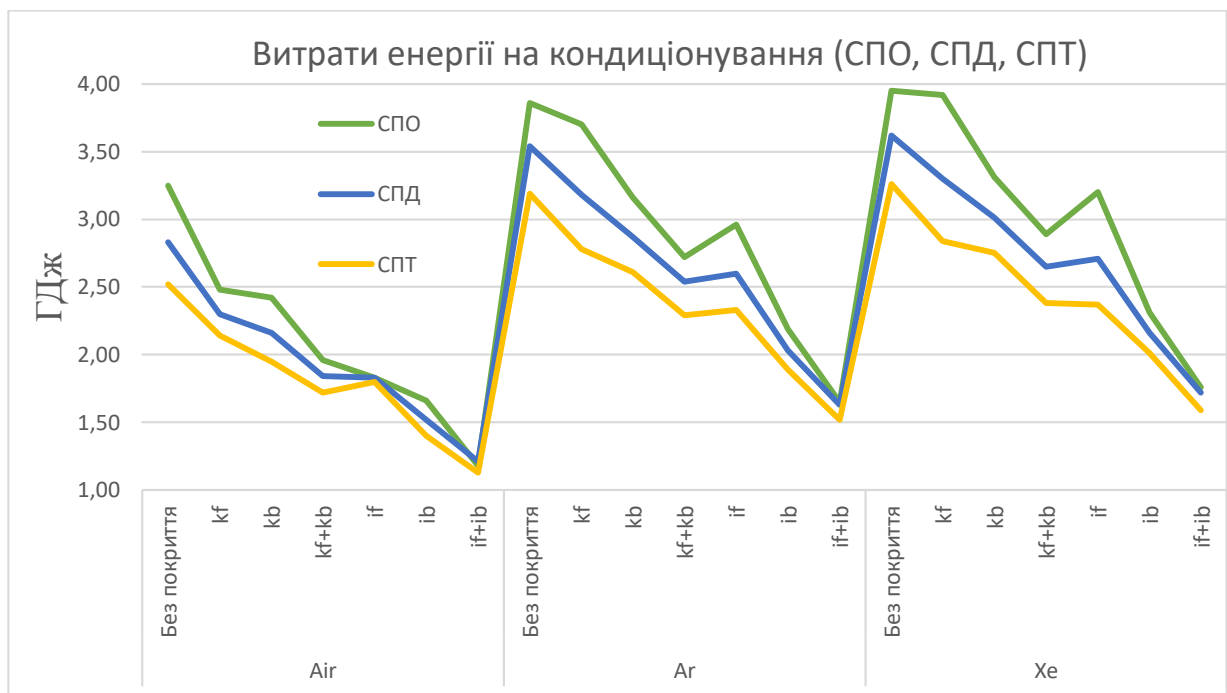


Рисунок 2.4.13 – Показники енерговитрат на кондиціювання при застосуванні відповідного СП

На рисунку 2.4.13 можна побачити, що найбільші збіги щодо чисельних значень енерговитрат на кондиціювання приміщення мають моделі із застосуванням комбінації двох *i*-покриттів, одне з яких направлене в бік зовнішнього фасаду, а інше в середину будівлі. Виключенням є застосування СП заповнених висушеним повітрям і з наявністю одного *i*-покриття з *f*-орієнтацією – їх параметри також збігаються незалежно від кількості камер застосованих в склопакеті.

2.5 Визначення оптимального СП

Розрахунки щодо витрат коштів для задоволення енергопотреб приміщення проведемо за формулою 2.1:

$$B = W_H \cdot T_{\text{т.е.}} + \frac{W_C}{4} \cdot T_{\text{е.е.}} \quad (2.1)$$

де, W_H – кількість енергії витраченої на опалення [Гкал];

W_C – кількість енергії витраченої на охолодження [кВт·год];

$T_{\text{т.е.}} = 1355,83$ грн, тариф на теплову енергію для м. Київ;

$T_{\text{е.е.}} = 1.68$ грн, тариф на електроенергію для м.Київ;

(4) – коефіцієнт ефективності холодильної установки.

Отримані розрахунки зводимо до таблиці 2.5.1.

Таблиця 2.5.1 – Вартість затрачених енергоресурсів моделі з відповідним СП

№	Склопакет (формула)	Вартість енергоресурсу (грн/рік)	№	Склопакет (формула)	Вартість енергоресурсу (грн/рік)
1	2	3	4	5	6
1	4-Ar-4	2747,84	33	4-Air-4-Air-4if	3246,56
2	4-Ar-4kf	2479,66	34	4ib-Air-4-Air-4	3317,33
3	4kb-Ar-4	2510,62	35	4ib-Air-4-Air-4if	3423,74
4	4kb-Ar-4kf	2524,09	36	4-Air-4-Air-4-Air-4	2990,06
5	4-Ar-4if	2493,77	37	4-Air-4-Air-4-Air-4kf	3046,18
6	4ib-Ar-4	2565,95	38	4kb-Air-4-Air-4-Air-4	3082,34
7	4ib-Ar-4if	2658,49	39	4kb-Air-4-Air-4-Air-4kf	3126,79
8	4-Ar-4-Ar-4	2542,00	40	4-Air-4-Air-4-Air-4if	3126,41
9	4-Ar-4-Ar-4kf	2409,26	41	4ib-Air-4-Air-4-Air-4	3222,32
10	4kb-Ar-4-Ar-4	2441,14	42	4ib-Air-4-Air-4-Air-4if	3304,23
11	4kb-Ar-4-Ar-4kf	2389,68	43	4-Xe-4	2712,97
12	4-Ar-4-Ar-4if	2435,56	44	4-Xe-4kf	2424,31
13	4ib-Ar-4-Ar-4	2514,88	45	4kb-Xe-4	2443,87
14	4ib-Ar-4-Ar-4if	2497,37	46	4kb-Xe-4kf	2449,96
15	4-Ar-4-Ar-4-Ar-4	2446,07	47	4-Xe-4if	2424,56
16	4-Ar-4-Ar-4-Ar-4kf	2375,55	48	4ib-Xe-4	2485,98
17	4kb-Ar-4-Ar-4-Ar-4	2404,33	49	4ib-Xe-4if	2567,63

Продовження таблиці 2.5.1

1	2	3	4	5	6
18	4kb-Ar-4-Ar-4-Ar-4kf	2376,71	50	4-Xe-4-Xe-4	2499,49
19	4-Ar-4-Ar-4-Ar-4if	2407,30	51	4-Xe-4-Xe-4kf	2348,73
20	4ib-Ar-4-Ar-4-Ar-4	2485,58	52	4kb-Xe-4-Xe-4	2379,71
21	4ib-Ar-4-Ar-4-Ar-4if	2487,78	53	4kb-Xe-4-Xe-4kf	2321,50
22	4-Air-4	3191,89	54	4-Xe-4-Xe-4if	2364,15
23	4-Air-4kf	3273,80	55	4ib-Xe-4-Xe-4	2442,55
24	4kb-Air-4	3286,24	56	4ib-Xe-4-Xe-4if	2417,14
25	4kb-Air-4kf	3381,63	57	4-Xe-4-Xe-4-Xe-4	2405,63
26	4-Air-4if	3408,58	58	4-Xe-4-Xe-4-Xe-4kf	2320,99
27	4ib-Air-4	3447,08	59	4rb-Xe-4-Xe-4-Xe-4	2352,61
28	4ib-Air-4if	3604,94	60	4rb-Xe-4-Xe-4-Xe-4kf	2322,40
29	4-Air-4-Air-4	3071,60	61	4-Xe-4-Xe-4-Xe-4if	2347,16
30	4-Air-4-Air-4kf	3142,62	62	4ib-Xe-4-Xe-4-Xe-4	2421,81
31	4kb-Air-4-Air-4	3168,41	63	4ib-Xe-4-Xe-4-Xe-4if	2421,41
32	4kb-Air-4-Air-4kf	3221,81			

Можна зробити висновок, що застосування варіанту скління №58 призведе до найменших витрат на енергоресурси на опалення/кондиціювання приміщення. А застосування скління №28 навпаки призведе до найбільших експлуатаційних витрат.

Сортування від нижчої суми витрат до вищої проведемо за допомогою програмного забезпечення IBM SPSS Statistics (додаток А) та графічно виведемо відсоткове сортування по вартості (рисунок 2.5.1)

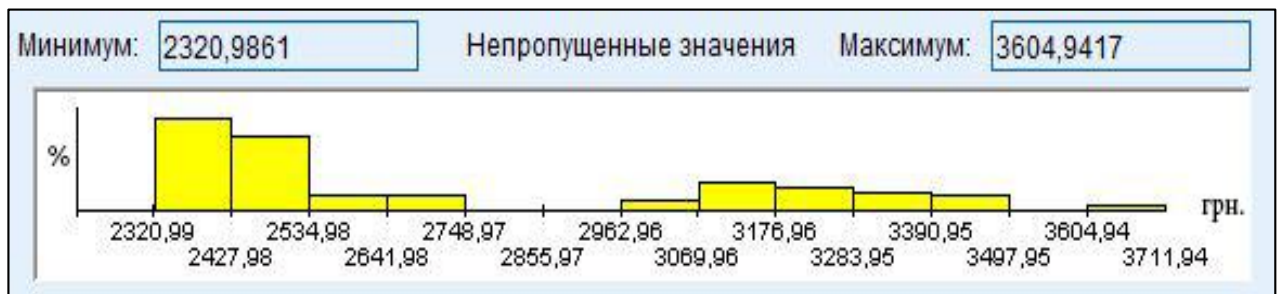


Рисунок 2.5.1 – Відсоткове сортування по затратам на енергоресурси

З рисунка 2.5.1 можна побачити, що серед представлених моделей майже половина знаходиться в діапазоні витрат від 2320 грн до 2500 грн. Якщо зіставити

графік з даними (додаток А), то ми побачимо, що в цьому діапазоні знаходяться СПД і СПТ з аргоновим або ксеноновим заповненням і наявними k -покриттями.

В кінцевому результаті зрівнявши ринкові ціни [17] на СП з першого діапазону було визначено, що найкращим варіантом скління в даному випадку є №51. Його показники при застосуванні в нашій моделі дали результат лише 30 грн дорожче за лідируючий варіант №58, але ціна самого СП нижча на 650 грн [18].

Висновок до розділу 2

Моделювання у програмному середовищі EnergyPlus дозволяє отримати необхідну картину взаємодії всіх факторів для проведення якісного аналізу енергетичних характеристик. Тому серед всіх можливих методів дослідження енергоспоживання в будівлі динамічне моделювання є найбільш точним шляхом для отримання якісних результатів.

В даному випадку було розглянуто модель приміщення із застосуванням різноманітних видів скління, зрівнявши енергетичні показники яких, було визначено, що найбільш оптимальним варіантом скління для будівлі з відповідним географічним положенням є двокамерний склопакет заповнений інертним газом з наявним k -покриттям для якого направлена зменшення тепловтрат з середини будівлі. Саме застосування даного СП з низькоемісійним покриттям ніяким чином не погіршує пропускання сонячного світла в середину будівлі та не змінює оптичних характеристик видимої частини спектра, що в протилежному разі може бути наслідком погіршення зору.

Економічний ефект проявляється головним чином в здатності блокувати прохід теплового випромінювання через вікна з середини приміщення в навколишнє середовище, цим самим зменшуючи споживання теплової енергії в опалювальний сезон.

3. НАЯВНА ПРИЛАДОВА БАЗА

3.1 Прилади для вимірювання коефіцієнта емісії

Найбільші тепловтрати зовнішньої оболонки будівлі відбуваються через ВК в зв'язку з низьким значенням їх термічного опору теплопередачі, тому важливим завданням при підвищенні енергозбереження будівель різного призначення є оптимальний вибір саме віконних конструкцій [19]. Основними механізмами теплопереносу через такі конструкції є: теплопровідність через скло, конвекція в газовому середовищі, що заповнює простір між стеклами, а також променеве теплоперенесення між поверхнями скла. Загалом зменшення теплопередачі через світлопрозорі огорожувальні конструкції досягається шляхом підвищення термічного опору скла і газового прошарку між склом, а також шляхом зниження рівня променевого теплопереносу [20]. Саме з останнім варіантом покращення теплофізичних властивостей ВК і поводитимуться наші вимірювання в розділі 4.

На даний час, вже існують прилади, що можуть визначати коефіцієнт емісії селективного покриття на готовому виробі. Тобто дослідження можна проводити зі склопакетами які експлуатуються. Це в свою чергу дасть змогу моніторити зміни теплофізичних властивостей такого покриття.

Аналізатор на базі ІК-Фур'є спектрометра PerkinElmer Spectrum Two це прилад, що має оптичні елементами з броміду калію (KBr), і може вимірювати коефіцієнт відбиття в діапазоні від 2 до 25 мкм. Та налізатор на базі ІК-Фур'є спектрометра PerkinElmer Frontier (рисунок 3.1.1) з оптичними елементами, виготовленими з йодиду цезію, дозволяє вимірювати коефіцієнт відбиття в діапазоні від 2 до 50 мкм [21].



Рисунок 3.1.1 - ІК-Фур'є спектрометри Spectrum Two і Frontier компанії PerkinElmer

Такі аналізатори є досить точними і простими в користуванні, за допомогою спеціального ПЗ дані досліджень відображаються в вигляді звітів та спектрограм (рисунок 3.1.12).



Рисунок 3.1.2 – Процес здійснення вимірів

3.2 Розробки вітчизняних науковців

У даний час, в Україні діє ряд нормативних документів [22-24] з визначення теплофізичних характеристик і тепловим розрахунками світлопрозорих конструкцій. У цих стандартах регламентована методика визначення

терморадіаційних характеристик (ТРХ) енергоефективних стекел оптичним способом. Відповідно до даної методики для 30 рекомендованих значень довжини хвилі (λ) в діапазоні від 5,5 до 50,0 мкм з застосуванням спеціалізованого приладу – ІК-спектрофотометра Фур'є вимірюють спектральні коефіцієнти відбиття при середній температурі 283 К, після чого розраховують нормальний коефіцієнт відображення як їх середнє арифметичне:

$$R_n = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} R_n(\lambda_i) \quad (3.1)$$

Далі визначають нормальний коефіцієнт емісії:

$$\varepsilon_n = 1 - R_n \quad (3.2)$$

З наступним перерахунком в інтегральні напівсферичні величини з використанням рекомендованих емпіричних коефіцієнтів. Власна приладова база для проведення таких досліджень в Україні відсутня. Вартість же ІК-спектрофотометра імпортного виробництва зі спектральним діапазоном до 25 мкм становить від 150 тис. до 500 тис. грн., а вартість приладу зі спектральним діапазоном до 50 мкм в 2-3 рази вище. Внаслідок тривалості і дороговизни подібних досліджень, проводять їх, як правило, один раз при сертифікації нового типу енергоефективного скла при вже відпрацьованій технології виробництва, або взагалі використовують літературні дані для близьких аналогів.

Установка ІТРС-1 реалізує калориметричний метод вимірювання інтегральних напівсферичних ТРХ при первинній інформації про потоки теплового випромінювання, отриманої із застосуванням термоелектричних перетворювачів теплового потоку. Розрахунок здійснюється за формулою:

$$\varepsilon_{\text{обр}} = \frac{q_{\text{рад}}}{\sigma_0 \cdot (T_2^4 - T_4^4) - q_{\text{рад}} \cdot \frac{F_1}{F_2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}, \quad (3.3)$$

$$q_{\text{рад}} = q_{\text{птп}} - (T_2 - T_4) \cdot \frac{\lambda_2}{H}, \quad (3.4)$$

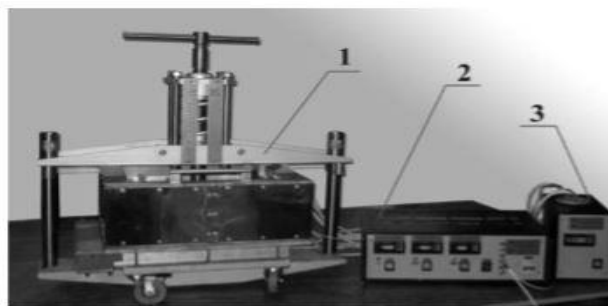
де, $q_{\text{рад}}$ – густина радіаційного теплового потоку

На даний момент актуальною є розробка методики для визначення коефіцієнта емісії енергозберігаючих стекол і покриттів, яка може бути реалізована на власній приладовій бази. Для вирішенню даної проблеми застосовується Установа ІТ-7С яка також є розробкою ІТТФ НАНУ і не має аналогів в Україні.

Технічні характеристики установки ІТ-7С:

- діапазон значень коефіцієнта теплопровідності від 0,02 до 3,0 Вт/(м·К);
- межі допустимої основної відносної похибки вимірювань 3%;
- діапазон значень робочої температури від мінус 40 до 180 °С;
- діапазон значень середньої температури від зразка мінус 35 до 175 °С;
- розмір зразка 300 × 300 × 120 мм (max).

Для проведення вимірювань ТРХ енергоефективних покриттів на установці ІТ-7С (рисунок 3.2.1) формують дослідний зразок у вигляді блоку (пакету) з стекол з повітряним проміжком заданої величини $h_{\text{возд}}$. Скло розташовують паралельно одне до іншого, при цьому сторони з покриттям повинні бути всередині, тобто, повернуті один до одного. Пакет стекол встановлюють у вимірювальну комірку теплового блоку установки ІТ-7С і задають значення температури нагрівача $T_{\text{нагр}}$ і холодильника $T_{\text{хол}}$ блоку таким чином, щоб перепад температури на поверхнях дослідного пакета становив приблизно 10 °С. У стаціонарному режимі вимірюють різницю температур на верхній і нижній поверхнях блоку стекол і щільність теплового потоку, що проходить крізь цей блок.



*Внешний вид установки ИТ-7С:
1 – тепловой блок, 2 – электронный блок,
3 – блок термостатирования опорных спаев.*

Рисунок 3.2.1 – Зовнішній вигляд установки ІТ-7С

На підставі проведених вимірювань розраховують тепловий опір пакету стекол за формулою:

$$R_{\text{пак}} = \frac{\Delta T}{q_{\text{ср}}} = \frac{T_{\text{нагр}} - T_{\text{хол}}}{0,5 \cdot (q_{\text{нагр}} + q_{\text{хол}})}. \quad (3.5)$$

З іншого боку, з огляду на тепловий опір самих стекол і теплообмін в повітряному зазорі, тепловий опір блоку стекол становить:

$$\begin{aligned} R_{\text{пак}} &= 2R_{\text{ст}} + \left(\frac{1}{R_{\text{возд}}} + \frac{1}{R_{\text{рад}}} \right)^{-1} = \\ &= \frac{2h_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \left(\frac{\lambda_{\text{возд}}}{h} + 4\varepsilon_{\text{пр}}\sigma T_{\text{ср}}^3 \right)^{-1}, \end{aligned} \quad (3.6)$$

де термічний опір скла і повітряного зазору рівні, відповідно:

$$R_{\text{ст}} = \frac{h_{\text{ст}}}{\lambda}, \quad R_{\text{возд}} = \frac{h_{\text{возд}}}{\lambda_{\text{возд}}}. \quad (3.7)$$

Величина, зворотна радіаційної складової теплового опору повітряного зазору становить:

$$\frac{1}{R_{\text{рад}}} = 4\varepsilon_{\text{пр}}\sigma T_{\text{ср}}, \quad (3.8)$$

де $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведений коефіцієнт емісії пакета; $T_{\text{ср}} = 0,5 \cdot (T_{\text{нагр}} + T_{\text{хол}})$ – середнє значення температури пакета, К; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт / (м² · К⁴) – постійна Стефана Больцмана. З виразу (3.8) з урахуванням (3.5) – (3.7) отримаємо формулу для розрахунку:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{\left[\left(\frac{\Delta T}{q_{\text{ср}}} - \frac{2h_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} \right)^{-1} - \frac{\lambda_{\text{возд}}}{h_{\text{возд}}} \right]}{4\sigma T_{\text{ср}}^3}. \quad (3.9)$$

Використовуючи отримане значення наведеного коефіцієнта емісії пакета і враховуючи, що для двох нескінченних паралельних пластин справедливим є вираз (3.9)

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{2 \cdot \varepsilon_{\text{пок}}^{-1} - 1}, \quad (3.10)$$

розраховують коефіцієнт емісії поверхні енергоефективного скла (покриття) за формулою:

$$\varepsilon_{\text{пок}} = \frac{2}{\varepsilon_{\text{пр}}^{-1} + 1}. \quad (3.11)$$

Розроблена ІТТФ НАН України методика дозволяє провести розрахунок коефіцієнта емісії енергоефективного скла (покриття) на базі результатів прямих вимірювань значень теплових потоків, температури і геометричних розмірів досвідченого пакета без використання дефіцитного і дорогого імпортного обладнання та перерахунку результатів вимірювань із застосуванням емпіричних коефіцієнтів [25].

Висновок до розділу 4

Застосування приладів, які можуть виміряти коефіцієнт емісії скла є досить дорогою процедурою, через що виробники енергозберігаючих стекол не в змозі аналізувати кожную вироблену партію, а лише певну їх частину для перевірки відхилень. Або взагалі використовують тільки методичні дані, що призводить до великих розбіжностей між номінальними та фактичними характеристиками скління.

На даний час, в Україні, розробляються технології, що дозволять робити відповідні розрахунки більш доступними для запобігання вище перелічених проблем.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Експериментальні дослідження для віконних склопакетів.

З метою визначення густини теплового потоку, що проходить крізь склопакети різної конфігурації, а також світлопропускання цих СП було створено експериментальний стенд для проведення відповідних випробувань.

Для проведення випробувань світлопрозорості склопакетів був застосований прилад Mother Tool LM-8000 рисунок 4.1.1



Рисунок 4.1.3 – Люксметр Mother Tool LM-8000

В якості датчиків теплового потоку було використано високочутливі датчики в корпусі (рисунок 4.1.2) виконані у вигляді жорсткої пластини круглої форми діаметром 25 мм або ж прямокутної форми з розмірами 20×12 мм , поверхня яких має високу ступінь чорноти.



Рисунок 4.1.2 – Датчики, що застосовувалися для вимірювання теплового потоку

Данні, що знімалися з датчиків виводилися на мультиметри Mastech M3900 та Alda DT-830B (рисунок 4.1.3).



Рисунок 4.1.3 – Мультиметри, що застосовувались для вимірювань

Показники температури навколишнього середовища знімалися за допомогою цифрового термометра TP101 (рисунок 4.1.4).

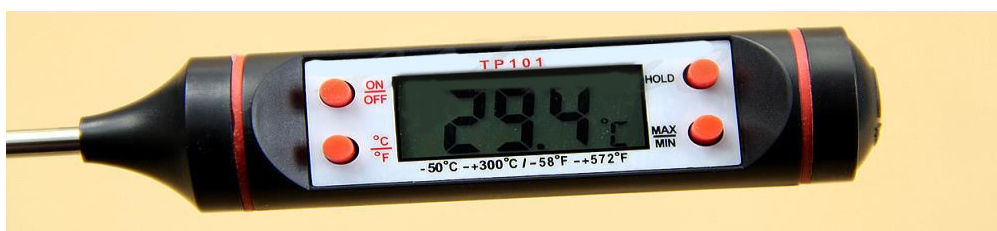


Рисунок 4.1.4 – Цифровий термометр TP101

Щоб знімати показники температур на поверхні склопакетів було застосовано пірометр GM 320 (рисунок 4.1.5).



Рисунок 4.1.5 – Пірометр GM 320

Експеримент №1 проводився за густої хмарності на відкритій місцевості в години пікового сонцестояння, місце проведення експерименту м. Київ.

Стенд складався з підставки висотою 70см від землі, платформи та направляючих за допомогою, яких змінювався кут положення СП відносно земної поверхні (рисунок 4.1.6), також було застосоване обладнання зазначене вище (рисунок 4.1.7).

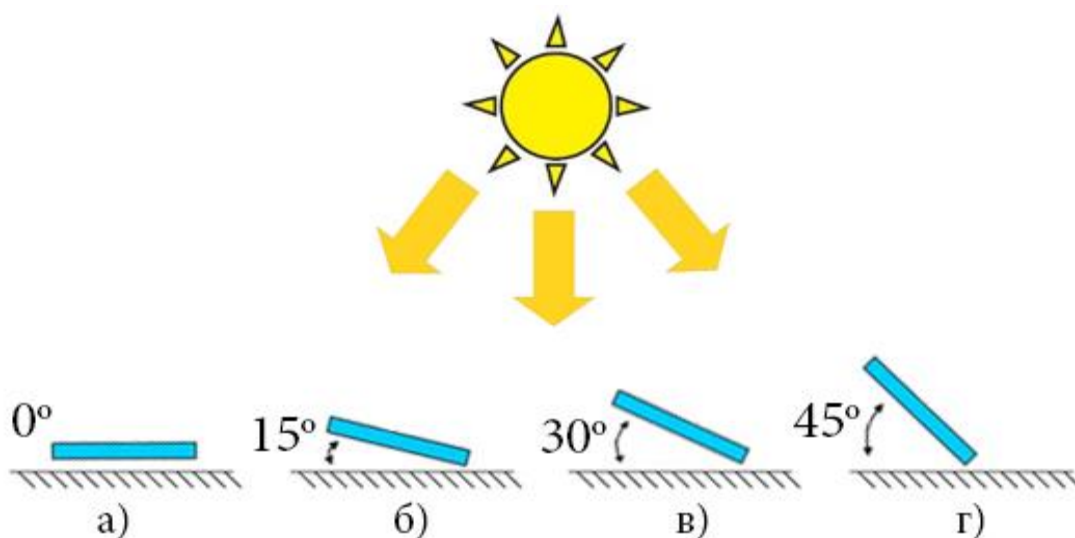


Рисунок 4.1.6 – Положення експериментальних зразків відносно земної поверхні

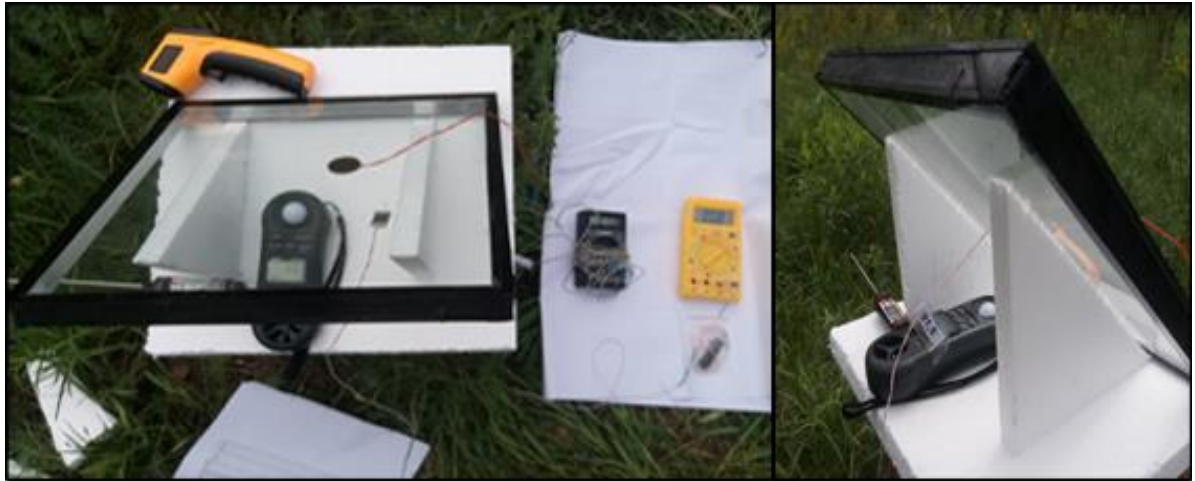


Рисунок 4.1.7 – Вигляд експериментального стенду

Досліджувалися 6 варіантів конструкцій СП:

- одно- та двокамерний склопакет зі звичайним склом (коефіцієнт емісії $\varepsilon = 0,84$);
- одно- та двокамерний склопакет з низькоемісійним і-покриттям ($\varepsilon = 0,06$) нанесеним на поверхню внутрішню поверхню зовнішньої шибки;
- одно- та двокамерний склопакет з низькоемісійним k-покриттям ($\varepsilon = 0,18$) нанесеним на поверхню внутрішню поверхню зовнішньої шибки.

Всі характеристики СП представлені на сайті виробника [26].

Після дослідження густини теплового потоку було отримано наступні данні (таблиця 4.1.1)

Таблиця 4.1.1 – Результати експерименту в хмарний день

Тепловий потік					
День 1 (хмарно)	Кут нахилу відносно земної поверхні	Густина теплового потoku, на поверхні скла, [Вт/м ²]	Густина теплового потoku, що проходить крізь скло, [Вт/м ²]	Температура на поверхні скла, [°C]	Температура навколишнього середовища, [°C]
1	2	3	4	5	6
СПО	0°	206,01	156,06	27,9	21
	15°	188,44	146,88	28	21,8
	30°	154,98	102,62	29,5	21,9
	45°	134,19	91,8	28,6	21,3

Продовження таблиці 4.1.1

1	2	3	4	5	6
СПО з і-склом	0°	196,56	64,26	29	22,3
	15°	185,22	55,08	28,8	21,7
	30°	166,32	55,08	27,6	21,9
	45°	153,09	45,9	28,3	21,4
СПО з к-склом	0°	154,98	73,44	27,3	21,2
	15°	147,42	73,44	28,8	21,8
	30°	141,75	64,26	28,7	22,6
	45°	124,74	45,9	28	22,8
СПД	0°	228,69	174,42	29,7	23,4
	15°	215,46	137,7	29,3	22,9
	30°	209,79	137,7	28,3	22,8
	45°	204,12	128,52	28,5	23,2
СПД з і-склом	0°	221,92	100,98	29,1	23,7
	15°	198,45	91,8	29,1	22,9
	30°	196,56	82,62	29,5	23,3
	45°	190,89	82,62	29,4	23,3
СПД з к-склом	0°	215,46	110,16	28,3	22,5
	15°	211,68	100,98	28	22,5
	30°	202,23	73,44	27,6	22,6
	45°	181,44	64,26	27,5	22,5

Для наглядності було побудовано графік, що характеризує кількість теплоти, що потрапляє на поверхню СП і що проходить крізь нього (рисунк 4.1.8).

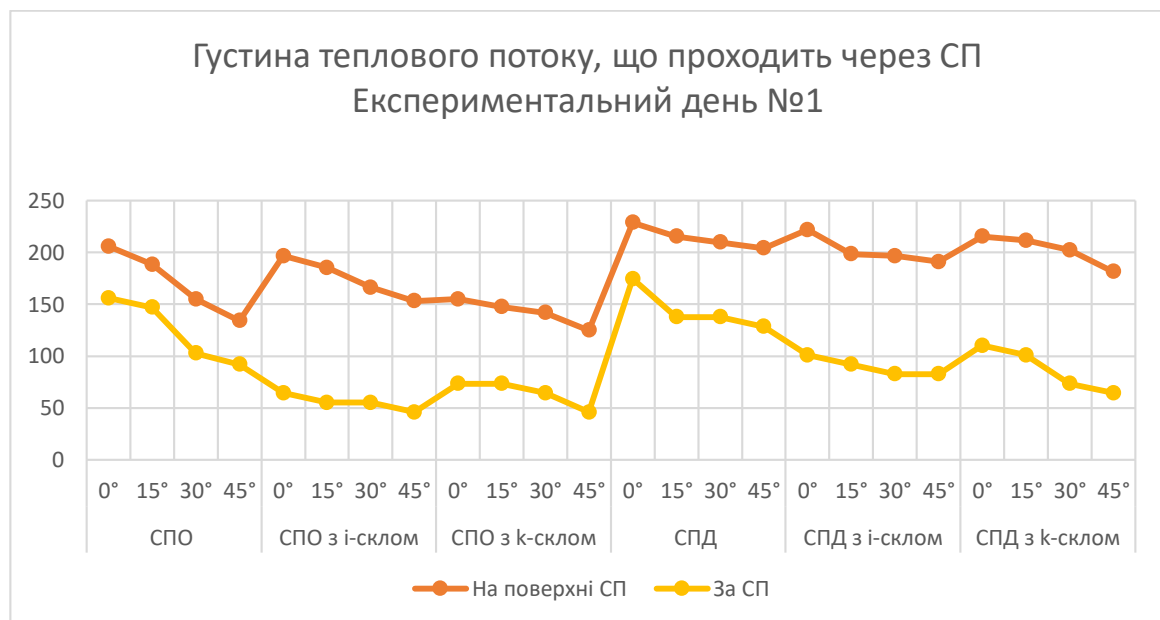


Рисунок 4.1.8 – Результати експерименту в хмарний день

З графіка (рисунок 4.1.8) можна побачити, що тепловий потік від сонця є дуже не стабільним через погодні умови (хмарність), але навіть в цьому випадку можна побачити різницю теплопровідності СП зі звичайним склом та з селективними стеклами.

Також були проведені заміри світлового потоку, що проходить крізь СП (таблиця 4.1.2).

Таблиця 4.1.2 – Результати експерименту в хмарний день

Світлопрозорість			
День 1 (хмарно)	Кут нахилу СП відносно земної поверхні	Освітленість на поверхні СП, [лк]	Густина світлового потoku, що проникає через СП, [лк]
СПО	0°	3870	3420
	15°	3740	3470
	30°	3710	3400
	45°	3770	3540
СПО з і-склом	0°	4010	3540
	15°	3750	3500
	30°	3650	3220
	45°	3620	3150
СПО з к-склом	0°	3800	3450
	15°	3640	3310
	30°	3720	3340
	45°	3630	3290
СПД	0°	4000	3350
	15°	4000	3400
	30°	3880	3190
	45°	3700	3040
СПД з і-склом	0°	3980	3150
	15°	3870	3150
	30°	3640	3000
	45°	3620	2740
СПД з к-склом	0°	3920	2980
	15°	3900	2940
	30°	3920	2910
	45°	3690	2750

Та побудований відповідний графік (рисунок 4.1.9)

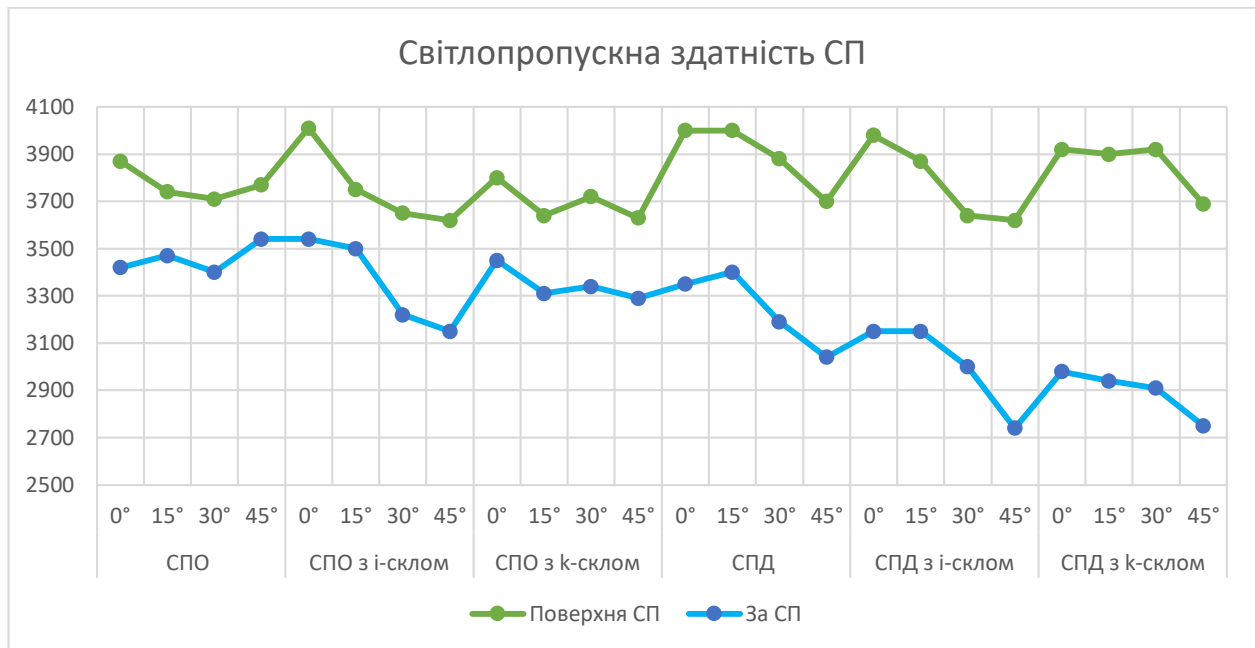


Рисунок 4.1.9 – Результати експерименту в хмарний день

Як видно з графіка (рисунок 4.1.9) показники дуже різняться між собою, що викликано не стаціонарністю освітлення під час густої хмарності, тому наступний дослід буде проведено при стабільному освітленні з постійним джерелом світла.

Експеримент №2 проводився аналогічно першому, але вже за ясної сонячної погоди. Були отримані наступні результати (таблиця 4.1.3).

Таблиця 4.1.3 – Результати експерименту в сонячний день

Тепловий потік					
День 2 (сонячно)	Кут нахилу відносно земної поверхні	Густина теплого потіку, на поверхні скла, [Вт/м ²]	Густина теплого потіку, що проходить крізь скло, [Вт/м ²]	Температур а на поверхні скла [°C]	Температура навколишнього середовища [°C]
1	2	3	4	5	6
СПО	0°	840,29	705,02	36,2	27,6
	15°	798,61	596,96	36	27,7
	30°	663,39	543,46	35,1	28,5
	45°	641,12	499,39	35,6	28,5

Продовження таблиці 4.1.3

1	2	3	4	5	6
СПО з і-склом	0°	852,20	484,70	37,3	28,6
	15°	790,25	425,95	37,8	28,5
	30°	683,80	411,26	36,4	28,4
	45°	557,93	323,14	36,5	28,5
СПО з к-склом	0°	860,71	489,11	37,5	28,3
	15°	841,02	506,74	36	28,8
	30°	673,60	479,39	36,8	29,1
	45°	540,92	361,95	36,4	29
СПД	0°	853,90	640,19	36,2	28,8
	15°	762,05	594,70	36	28,9
	30°	697,41	502,67	35,7	29,2
	45°	547,72	415,33	35,8	29,2
СПД з і-склом	0°	847,10	417,30	38,4	28,3
	15°	731,43	398,04	38,5	28,7
	30°	659,99	343,70	38,1	28,4
	45°	534,11	271,73	38	28,7
СПД з к-склом	0°	875,67	471,33	37,4	29,1
	15°	807,62	393,64	37,7	29,5
	30°	656,59	374,54	37,5	28,8
	45°	552,83	308,45	37,5	28,7

Дані також зображені на графіку (рисунок 4.1.10)

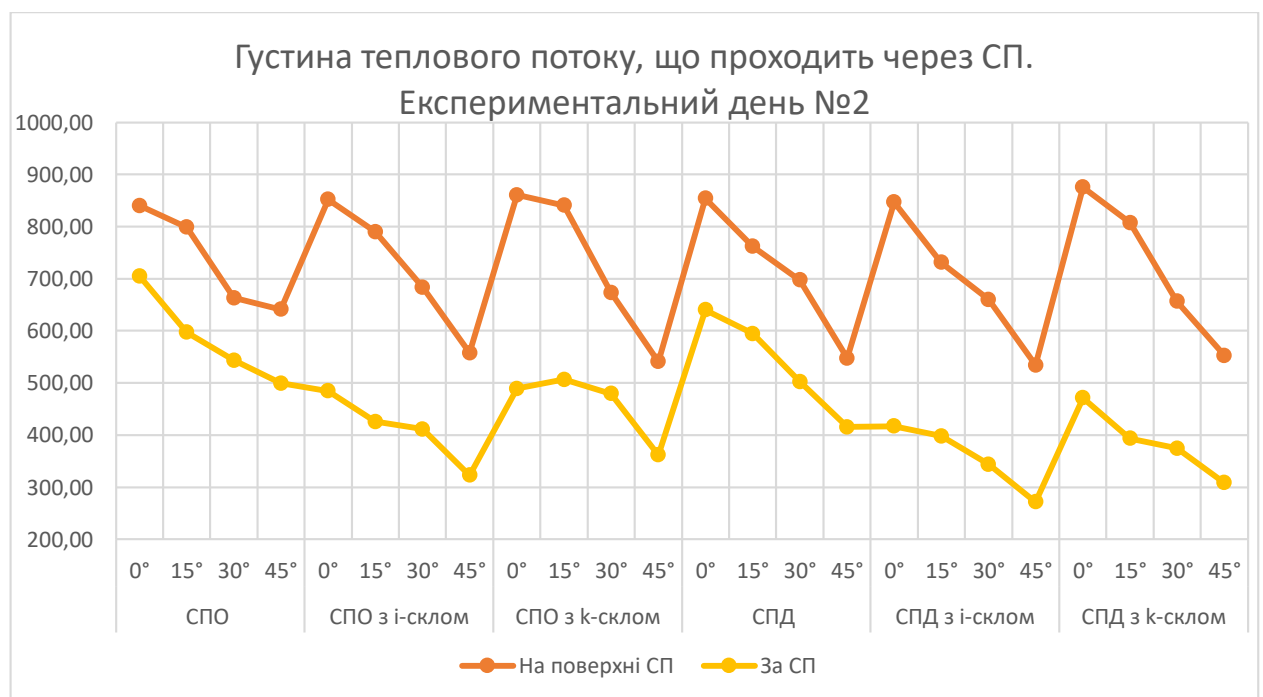


Рисунок 4.1.10 – Результати експерименту в сонячний день

З даного графіка (рис. 4.1.10), на відміну від попереднього (рис. 4.1.9), чітко видно залежність проходження теплового потоку через ВК від наявності покриття, адже цього разу, при ясному небі, не виникало питань стабільного теплового потоку. Проаналізувавши викладені дані можна зробити висновок, що однокамерний склопакет навіть з к-склом має більший опір теплопередачі ніж двокамерний склопакет зі звичайними скляними шибками. Експериментально підтверджено, що наявність низькоемісійного покриття та правильне його положення в СП дасть змогу не тільки економити енергоресурси на опалення чи кондиціонування, а й зменшити масивність ВК за рахунок меншої кількості камер зі збереженням теплофізичних параметрів.

Також було проведено експеримент щодо світлопропускання, але вже за стаціонарних умов. Експеримент проводився в закритому приміщенні в якості джерела світла була застосована LED лампа Eurolamp потужністю 15Вт та світловою температурою в 4000К. Відстань від джерела світла до стенда 1,5м. Результати вимірювань представлені в таблиці 4.1.4.

Таблиця 4.1.3 – Результати експерименту при стаціонарних умовах

Світлопрозорість					
День 1 (хмарно)	Кут нахилу СП відносно Сонця	Освітленість на поверхні СП, [лк]	Густина світлового потoku, що проникає через СП, [лк]	Різниця освітленості до та після СП, %	Середнє значення зниження світлопропус- кання
1	2	3	4	5	6
СПО	0°	335	285	14,93	16%
	15°	296	243	17,91	
	30°	278	238	14,39	
	45°	245	202	17,55	
СПО з і- склом	0°	339	251	25,96	22%
	15°	292	228	21,92	
	30°	268	226	15,67	
	45°	241	184	23,65	
СПО з к- склом	0°	331	237	28,40	25%
	15°	296	231	21,96	
	30°	271	219	19,19	
	45°	245	174	28,98	
СПД	0°	339	253	25,37	26%
	15°	306	220	28,10	

Продовження таблиці 4.1.4

1	2	3	4	5	6
СПД	30°	270	199	26,30	26%
	45°	240	181	24,58	
СПД з і-склом	0°	334	230	31,14	32%
	15°	305	204	33,11	
	30°	270	197	27,04	
	45°	236	145	38,56	
СПД з к-склом	0°	333	209	37,24	38%
	15°	300	197	34,33	
	30°	268	157	41,42	
	45°	236	138	41,53	

Та в графічному виді (рисунок 4.1.11)

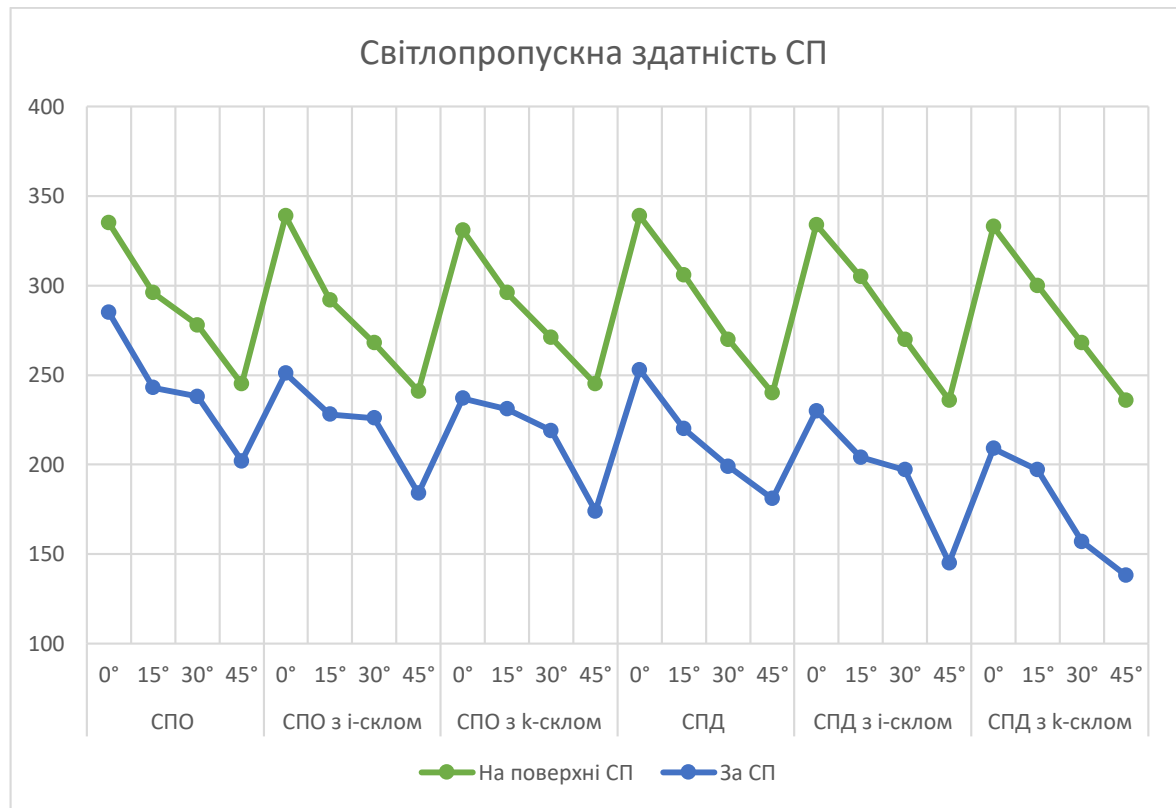


Рисунок 4.1.11 – Результати експерименту при стаціонарних умовах

З графіка (рисунок 4.1.11) бачимо, що якщо звичайний однокамерний пакет зменшує проникання світла на в середньому на 16%, то такий же склопакет з селективним і-покриттям зменшує цей показник до 22%, а з

k-покриттям до 25%. Якщо брати до уваги попередні висновки, то перевага залишається на боці СП з низькоемісійним покриттям, адже показники світлопропускання СПО з i-покриттям наближаються до показників СПД без покриття.

Висновок до розділу 5

Проведення експериментальних досліджень показало фактичну залежність світло- та теплопропускну здатності енергозберігаючого скла від коефіцієнта емісії напилення. Було визначено, що наявність низькоемісійного покриття дійсно знижує світлопропускну здатність скління, але відсоток цього зниження не впливає на відповідність встановленим нормам, щодо показників освітлення.

Спостереження також показали, що поверхнева температура стекол з покриттям завжди є вищою за показники зняті зі звичайного скла.

5 ІДЕЯ ВПРОВАДЖЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

У якості стартап-проекту пропонується створити відділ розрахункових робіт з підбору найбільш оптимального варіанту скління для будівель, що проектуються, або вже надані в експлуатацію. Головною ідеєю є те, що за допомогою програмного забезпечення EnergyPlus, буде можливо створювати моделі, в яких відображатимуться точні дані географічних та конструктивних характеристик будівлі, що в свою чергу дасть змогу найбільш точно та легко отримати необхідні розрахунки.

Значна перевага такого відділу полягає в повній обізнаності клієнта, щодо вибору ВК та порівняно низька вартість на відмінну від побідних послуг, що надають досвідчені інститути та проектні організації.

Відділ буде працювати на правах аутсорсингу з компаніями, які займаються реалізацією віконних конструкцій та надаватиме послуги рекомендаційного характеру по вибору ВК відповідно наявним державними стандартам та з урахуванням необхідних характеристик будівлі. Співпраця з необмеженою кількістю таких компаній сприятиме постійному потоку замовлень. Також не відкидається можливість роботи з клієнтом напяму, з подальшим лобіюванням інтересів компаній-партнерів з метою отримання певного відсотку від продажів.

Головною статтею витрат в створенні такого виду діяльності буде придбання, ліцензійного пакету програмних продуктів EnergyPlus та ряду допоміжних додатків.

Ризики є мало прогнозованими і головним чином полягають в наявності оптимальної кількості замовлень, що сприятиме розвитку та розширенню майбутньої компанії.

Виконання робочих планів, можна регулювати збільшенням або зменшенням штату працівників, які в свою чергу отримують певний відсоток з кожного замовлення.

Як вже зазначалось раніше перевагами даного стартапу є:

- незначні початкові капіталовкладення;
- оптимальна вартість надаваних послуг;
- просте врегулювання ризиків.

До недоліків можна віднести лише: рекомендаційний характер надаваних послуг, що веде до унеможливлення роботи з клієнтами яким необхідні, ліцензовані проекти розрахунки.

Вцілому зіставивши всі переваги та недоліки даного проекту можна зробити висновки, що такий вид діяльності має право на існування та позитивні тенденції щодо сталого розвитку.

Висновок до розділу 5

В основу розробки ідеї для стартап-проекту покладені результати дослідження можливостей застосування програмних моделей для вивчення складових, що впливають на енергетичну ефективність будівель. Для подальшого розвитку даної ідеї необхідно оцінити ринкові можливості, які можна використати під час впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть заважати реалізації проекту. Це допоможе визначити напрями розвитку даного проекту з врахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

ВИСНОВКИ

1. У роботі було проведено аналіз ефективності застосування енергозберігаючого напилення у віконних конструкціях будівлі та розглянуто відповідність покращення теплотехнічних характеристик склопакетів в залежності від виду нанесеного покриття. Також проаналізовано зміни оптичних характеристик скління, а саме здатність пропускати сонячне та штучне світло. Проведено співставлення отриманих результатів з наявними чинними санітарно-гігієнічними та будівельними нормами щодо рівня освітлення приміщення.

2. Створено енергетичну модель будівлі з повним заданням параметрів відносно режиму роботи, конструктивних, кліматичних та географічних характеристик. Підтверджено, що моделювання дає можливість майже в повній мірі наблизитись до реальних умов ще на стадії проектування будівлі та визначитись з оптимальним підбором конструктивних складових з найбільш підходящим набором відповідних параметрів скління.

3. Після проведення комп'ютерних симуляцій було визначено, що найкращим варіантом скління для будівлі з даними параметрами буде застосування двокамерного склопакету заповненого інертним газом з наявністю низькоемісійного покриття, дія якого направлена на зменшення проходження інфрачервоного теплового потоку, що продукується опалювальними пристроями в середині будівлі.

4. Проведено експериментальні дослідження, які показали залежність світло- та теплопропускної здатності такого скла від коефіцієнта емісії напилення. Було визначено, що наявність низькоемісійного покриття дійсно знижує світлопропускну здатність скління, але відсоток цього зниження не впливає на відповідність встановленим нормам щодо показників освітлення.

5. Загальний висновок – при врахуванні всіх необхідних характеристик та правильності підбору – застосування низькоемісійного покриття в склінні дійсно дає вагомий результат в показниках економії затрачених енергоресурсів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вікна Волині [Електронний ресурс]: Монтаж вікна в зимовий період – Режим доступу: <http://www.vikna-volyni.com.ua/2013/01/22/>
2. Аспект плюс [Електронний ресурс]: Скло. Види скла. Обробка скла – Режим доступу: <http://aspectplus.com.ua/content/view/105/lang,ua/>
3. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель. [На заміну ДБН В.2.631:2006 (СНиП II-3-79), чинний від 08.07.2016]. Вид. офіц. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2016. 30 с.
4. Аспект плюс [Електронний ресурс]: Сонцезахисне скло – Режим доступу: <http://aspectplus.com.ua/content/view/164/2/lang,ua/>
5. Літинський та Літинський [Електронний ресурс]: Все, що треба знати про віконні конструкції – Режим доступу: http://litinskyandlitinsky.com/article_in.html
6. Будівельні матеріали. Склопакети клеєні будівельного призначення. Технічні умови: ДСТУ Б В.2.7-107:2008. – [Чинний від 01.01.2010]. К. : Держ. Ком. України у справах містобудування і архітектури, 2010. – 38 с. – (Нац. стандарт України).
7. Фаренюк Є.Г. Тепловий режим світлопрозорих огорожувальних конструкцій сучасних багатоповерхових будівель: дисертація канд. техн. наук: 05.23.01 / Нац. унів. водного господарства та природокористування. Рівне, 2015. 172 с.
8. Velux [Електронний ресурс]: Вікна спеціального призначення – Режим доступу: https://www.velux.ua/uk/products/mansardni_vikna/special-function
9. Г.Г. Фаренюк, Е.Г. Фаренюк. Конструктивные принципы повышения теплозащитных качеств оконных систем. Окон. технологии. 1999. № 1. С. 46-49.
10. ДСТУ Б В.2.7-107:2008. Будівельні матеріали. Склопакети клеєні будівельного призначення. [На заміну ДСТУ Б В.2.7-107-2001 (ГОСТ 24866-99); чинний від 01.01.2010]. Вид. офіц. Київ: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2009. 32 с.

11. Кужель Л.М. Закономірності теплопередачі через віконні конструкції : дисертація канд. техн. наук: 05.14.06 / Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2017. 41 с.
12. Reins [Електронний ресурс]: Історія в цифрах і фактах – Режим доступу: <http://reins.com.ua/energobzerigayuchi-skla-istoriya-v-tsyfrah-i-faktah.html>
13. Міщенко Р.А. Теплопровідність склопакетів у світлопрозорих огорожувальних конструкціях: канд. техн. наук: УДК 692.8 / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Україна. 2 с.
14. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program / D. B. Crawley, L. K. Lawrie [and others] // Energy and Buildings. – 2001. – Vol. 33. – P. 319-331.
15. Crawley D. B. EnergyPlus: new capabilities in a whole-building energy simulation program / D. B. Crawley, L. K. Lawrie [and others] // Seventh International IBPSA Conference (August 13-15, 2001, Rio de Janeiro)
16. Winkelmann F. C. Modeling windows in EnergyPlus / Winkelmann F. C. // Seventh International IBPSA Conference (August 13-15, 2001, Rio de Janeiro)
17. The official website EnergyPlus Energy Simulation Software. Input Output Reference. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel_custom/pdfs/pdfs_v8.6.0/InputOutputReference.pdf
18. Олта [Електронний ресурс]. Калькулятор металлопластиковых окон – Режим доступу: <https://olta.ua/calc/>
19. Басок Б.І., Давиденко Б.В., Гончарук С.М., Кужель Л.М. Експериментальні дослідження теплопереносу через сучасні віконні конструкції в реальних умовах їх експлуатації. Оконные технологии. 2015. №60(2), С. 24-26. URL: <http://wt.com.ua/biblioteka/arkhiv-nomerov/488-60-2-2015.html>
20. Басок Б.И., Давиденко Б.В., Новицкая М.П., Гончарук С.М., Недбайло А.Н. Влияние толщины газовой прослойки на термическое сопротивление однокамерного стеклопакета. Пром. Теплотехника. 2012. т.34, №1. С. 100-107.

21. Scheltec [Електронний ресурс]. Аналізатор коефіцієнта емісії скла – Режим доступу: <http://www.scheltec.ru/catalog/analyzers/analyzers-ft-ir/analyzer-emission-glass/>
22. ДСТУ EN 673:2009 Скло будівельне. Методика визначення коефіцієнта теплопередавання багатошарових конструкції (EN 673:1997, IDT).
23. ДСТУ Б В.2.7-228:2009 Будівельні матеріали. Скло з низькоемісійним м'яким покриттям. Технічні умови (ГОСТ 31364-2007, MOD).
24. ДСТУ ISO 10291:2009 Скло будівельне. Визначення коефіцієнта теплопередавання склопакета в усталеному режимі. Метод захищеної гарячої пластини (ISO 10291:1994, IDT).
25. Бурова З.А., Декуша Л.В., Воробьев Л.И., Мазуренко А.Г. Определение коэффициента эмиссии энергоэффективных стекол калориметрическим методом. ISSN 0204-3602. Пром. тепло техника, 2011, т. 33, №6
26. Вікна Корса [Електронний ресурс]. Ідеальні вікна для пасивного будинку – Режим доступу: <https://www.korsa.ua/ua/products/okna-rehau/rehau-geneo-phz>

Додаток А

Вартість енергоресурсів			Склопакет
1			2
2320,9861	Итого	N	1
	1		4-Xe-4-Xe-4-Xe-4kf
2321,5007	Итого	N	1
	1		4kb-Xe-4-Xe-4kf
2322,4025	Итого	N	1
	1		4rb-Xe-4-Xe-4-Xe-4kf
2347,1593	Итого	N	1
	1		4-Xe-4-Xe-4-Xe-4if
2348,7336	Итого	N	1
	1		4-Xe-4-Xe-4kf
2352,6109	Итого	N	1
	1		4rb-Xe-4-Xe-4-Xe-4
2364,1461	Итого	N	1
	1		4-Xe-4-Xe-4if
2375,5538	Итого	N	1
	1		4-Ar-4-Ar-4-Ar-4kf
2376,7104	Итого	N	1
	1		4kb-Ar-4-Ar-4-Ar-4kf
2379,7063	Итого	N	1
	1		4kb-Xe-4-Xe-4
2389,6772	Итого	N	1
	1		4kb-Ar-4-Ar-4kf
2404,3254	Итого	N	1
	1		4kb-Ar-4-Ar-4-Ar-4
2405,6348	Итого	N	1
	1		4-Xe-4-Xe-4-Xe-4
2407,3009	Итого	N	1
	1		4-Ar-4-Ar-4-Ar-4if
2409,2625	Итого	N	1
	1		4-Ar-4-Ar-4kf
2417,1394	Итого	N	1
	1		4ib-Xe-4-Xe-4if
2421,4141	Итого	N	1
	1		4ib-Xe-4-Xe-4-Xe-4if

2421,8115	Итого 1	N	4ib-Xe-4-Xe-4-Xe-4	1
2424,3132	Итого 1	N	4-Xe-4kf	1
2424,5577	Итого 1	N	4-Xe-4if	1
2435,5630	Итого 1	N	4-Ar-4-Ar-4if	1
2441,1420	Итого 1	N	4kb-Ar-4-Ar-4	1
2442,5533	Итого 1	N	4ib-Xe-4-Xe-4	1
2443,8730	Итого 1	N	4kb-Xe-4	1
2446,0740	Итого 1	N	4-Ar-4-Ar-4-Ar-4	1
2449,9564	Итого 1	N	4kb-Xe-4kf	1
2479,6553	Итого 1	N	4-Ar-4kf	1
2485,5808	Итого 1	N	4ib-Ar-4-Ar-4-Ar-4	1
2485,9782	Итого 1	N	4ib-Xe-4	1
2487,7767	Итого 1	N	4ib-Ar-4-Ar-4-Ar-4if	1
2493,7685	Итого 1	N	4-Ar-4if	1
2497,3707	Итого 1	N	4ib-Ar-4-Ar-4if	1
2499,4851	Итого 1	N	4-Xe-4-Xe-4	1
2510,6228	Итого 1	N	4kb-Ar-4	1
2514,8772	Итого 1	N	4ib-Ar-4-Ar-4	1
2524,0941	Итого 1	N	4kb-Ar-4kf	1
2541,9980	Итого	N		1

	1		4-Ar-4-Ar-4	
2565,9497	Итого	N		1
	1		4ib-Ar-4	
2567,6259	Итого	N		1
	1		4ib-Xe-4if	
2658,4854	Итого	N		1
	1		4ib-Ar-4if	
2712,9716	Итого	N		1
	1		4-Xe-4	
2747,8369	Итого	N		1
	1		4-Ar-4	
2990,0644	Итого	N		1
	1		4-Air-4-Air-4-Air-4	
3046,1809	Итого	N		1
	1		4-Air-4-Air-4-Air-4kf	
3071,6000	Итого	N		1
	1		4-Air-4-Air-4	
3082,3403	Итого	N		1
	1		4kb-Air-4-Air-4-Air-4	
3126,4071	Итого	N		1
	1		4-Air-4-Air-4-Air-4if	
3126,7944	Итого	N		1
	1		4kb-Air-4-Air-4-Air-4kf	
3142,6195	Итого	N		1
	1		4-Air-4-Air-4kf	
3168,4105	Итого	N		1
	1		4kb-Air-4-Air-4	
3191,8935	Итого	N		1
	1		4-Air-4	
3221,8063	Итого	N		1
	1		4kb-Air-4-Air-4kf	
3222,3158	Итого	N		1
	1		4ib-Air-4-Air-4-Air-4	
3246,5630	Итого	N		1
	1		4-Air-4-Air-4if	
3273,7959	Итого	N		1
	1		4-Air-4kf	
3286,2380	Итого	N		1
	1		4kb-Air-4	

3304,2285	Итого 1	N	4ib-Air-4-Air-4-Air-4if	1
3317,3278	Итого 1	N	4ib-Air-4-Air-4	1
3381,6270	Итого 1	N	4kb-Air-4kf	1
3408,5847	Итого 1	N	4-Air-4if	1
3423,7373	Итого 1	N	4ib-Air-4-Air-4if	1
3447,0776	Итого 1	N	4ib-Air-4	1
3604,9417	Итого 1	N	4ib-Air-4if	1
Итого	N			63